



Universidad  
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Eléctrica

PROYECTO FIN DE CARRERA

CALIDAD DE SUMINISTRO  
ELÉCTRICO: HUECOS DE Tensión.  
MITIGACIÓN DE SUS EFECTOS EN  
LAS PLANTAS INDUSTRIALES

Autor: Mario Monzón Moreno

Tutor: Fernando Soto Martos

Leganés, Junio de 2013

## Índice de contenido

Capítulo 1. Introducción y objetivos.....	8
1.1 Introducción.....	8
1.2 Objetivos.....	9
1.3 Estructura del documento.....	9
Capítulo 2. Sistema Eléctrico.....	11
2.1 Características de generación y consumo.....	12
2.2 Agentes del sistema.....	13
Capítulo 3. Calidad de suministro.....	15
3.1 Introducción.....	15
3.2 Tipo de perturbaciones.....	16
3.2.1 Cortes de tensión (o interrupciones).....	16
3.2.2 Huecos de tensión .....	18
3.2.3 Variaciones de tensión .....	19
3.2.4 Armónicos.....	20
3.2.5 Sobretensiones temporales.....	22
3.2.6 Sobretensiones transitorias.....	23
3.3 Huecos de tensión e interrupciones.....	26
3.4 Consideraciones económicas.....	27
Capítulo 4. Teoría de Huecos de Tensión.....	28
4.1 Caracterización de Huecos de Tensión.....	28
4.1.1 Magnitud.....	29
4.1.2 Duración.....	29
4.3 Clasificación de huecos según el tipo de evento.....	30
4.3.1 Hueco de Tensión debido a faltas.....	30
4.3.1.1 Cortocircuito Monofásico.....	30
4.3.1.2 Cortocircuito Bifásico.....	31
4.3.1.3 Cortocircuito Trifásico.....	32
4.3.2 Hueco de Tensión debido a arranque de motores.....	33
4.3.3 Huecos de tensión debidos a la energización de transformadores.....	34
4.4 Clasificación fasorial de huecos de tensión en líneas trifásicas.....	35
4.5 Huecos de tensión en serie.....	36
Capítulo 5. Normativa de calidad de onda.....	38
5.1 Continuidad de suministro .....	38
5.2 Calidad de producto eléctrico.....	42

5.3 Procedimiento de operación 12.3.....	42
5.4 Normativa específica para medir huecos de tensión.....	42
Capítulo 6. Impacto técnico.....	46
6.1 Curva ITIC-CBEMA.....	46
6.2 Impacto sobre sistemas eléctricos comunes.....	48
6.3 Impacto sobre elementos de control.....	48
6.4 Impacto sobre equipos de potencia.....	49
6.4.1 Transformadores.....	49
6.4.2 Motores.....	49
6.4.2.1 Motores de Inducción.....	50
6.4.2.2 Motores síncronos.....	51
Capítulo 7. Impacto económico en la industria.....	53
7.1 Metalurgia.....	54
7.1.1 Hornos de combustión.....	54
7.1.2 Hornos eléctricos.....	55
7.1.3 Procesos de laminado.....	55
7.2 Industria del automóvil.....	57
7.2.1 Fabricación de carrocería.....	57
7.2.2 Línea de ensamble.....	57
7.2.3 Fabricación de motores.....	58
7.3 Industria aeronáutica.....	59
7.3.1 Fabricación en bruto de piezas.....	59
7.3.2 Tratamiento de piezas.....	60
7.3.3 Montaje.....	61
7.3.4 Pintura.....	62
7.4 Ejemplo de costes.....	62
Capítulo 8. Mitigación de los huecos de tensión.....	64
8.1 Localización de la fuente del hueco de tensión.....	64
8.2 Soluciones desde la empresa suministradora.....	64
8.2.1 Prevención con mantenimiento.....	65
8.2.2 Bobina Petersen.....	65
8.2.3 Seccionamiento del sistema.....	66
8.2.4 Desarrollo de la red.....	66
8.3 Soluciones por parte del consumidor.....	67
8.3.1 Sensibilidad de los contactores.....	67
8.3.2 UPS, sistema de baterías .....	68

8.3.2.1 UPS "offline" .....	69
8.3.2.2 UPS "online" .....	70
8.3.3 Volantes de inercia.....	71
8.3.4 Restaurador dinámico de tensión .....	72
8.3.5 Variadores de frecuencia.....	73
8.3.6 Resumen de aplicaciones.....	74
8.4 Cuantificación económica de las soluciones. ....	75
Capítulo 9. Protocolo de estudio.....	77
9.1 Estudio de procesos vulnerables.....	77
9.2 Aparición de huecos de tensión.....	78
9.3 Estudio de inversión.....	79
Capítulo 10. Estudio de un caso ejemplo.....	81
10.1 Presentación del caso.....	81
10.2 Sensibilidad a huecos de tensión.....	82
10.3 Análisis económico de costes.....	83
10.4 Aparición de huecos de tensión.....	84
10.5 Análisis de inversiones.....	85
10.5.1 No acometer inversiones.....	86
10.5.2 Proteger instalación de control.....	87
10.5.3 Proteger toda la planta.....	87
10.6 Conclusiones.....	88
Capítulo 11. Presupuesto.....	89
Capítulo 12. Conclusiones.....	91
12.1 Conclusiones del proyecto.....	91
12.1.1 Técnicas.....	91
12.1.2 Personales.....	92
12.2 Posibles líneas de trabajo para futuros proyectos.....	92
Bibliografía.....	93
ANEXO 1. Categorías y características de las perturbaciones en el sistema de potencia eléctrico.....	97
ANEXO 2. Software Didáctico de Calidad de Onda de Alex McEACHERN. Edición 3.0.3.....	98

## Índice de figuras

Figura 1. Esquema del sistema eléctrico.....	11
Figura 2. Diagrama de reparto porcentual de la generación eléctrica por tecnologías...	12
Figura 3. Forma de onda sin defectos.....	15
Figura 4. Esquema de la conexión de un cliente a la red de MT.....	17
Figura 5. Ejemplo de huecos de tensión establecidos en la norma UNE-EN 50160.....	19
Figura 6. Suma de armónicos en desarrollo de Fourier.....	21
Figura 7. Forma de onda con sobretensión temporal.....	22
Figura 8. Sobretensión transitoria.....	24
Figura 9. Onda monofásica de tensión, caída del 60% y duración de 80 ms.....	29
Figura 10. Cortocircuito monofásico en red trifásica, caída del 60% y duración de 80 ms.....	31
Figura 11. Cortocircuito bifásico en red trifásica, caída del 60% y duración de 80 ms..	32
Figura 12. Cortocircuito trifásico, caída del 60% y duración 80 ms.....	33
Figura 13. Caracterización del hueco de tensión en rms producido por un motor de inducción.....	34
Figura 14. Caracterización del hueco de tensión en rms producido por energización de un transformador conectado directamente a carga.....	35
Figura 15. Tensión eficaz en huecos de tensión en serie.....	36
Figura 16. Fórmula del TIEPI.....	40
Figura 17. Fórmula del NIEPI.....	40
Figura 18. Curva tensión-tiempo que define el área del hueco de tensión.....	43
Figura 19. Curva ITIC-CBEMA.....	47
Figura 20. Esquema del proceso de fundido del hierro.....	54
Figura 21. Rodillos girando en el proceso de laminado.....	56
Figura 22. Laminado al rojo vivo.....	56
Figura 23. Línea de montaje en factoría Toyota. ....	58
Figura 24. Autoclave factoría Composystem.....	60
Figura 25. Montaje de secciones del A-350.....	61
Figura 26. Diagrama de conexión de la bobina Petersen.....	65
Figura 27. Rangos de funcionamiento de contactores en motores. ....	68
Figura 28. Diagrama de un sistema UPS offline.....	69
Figura 29. Diagrama de un sistema UPS online.....	70

Figura 30. Esquema de un volante de inercia.....	71
Figura 31. Esquema de instalación DVR.....	72
Figura 32. Ondas de tensión de entrada y salida del DVR.....	73
Figura 33. Esquema de un variador de frecuencia.....	74
Figura 34. Imagen de variador de frecuencia.....	74
Figura 35. Parte inferior externa del ala. ....	81

## Índice de tablas

Tabla 1. Rangos de tiempo y valores de interrupciones, hueco de tensión y sobretensiones.....	26
Tabla 2. Límites de calidad individual.....	39
Tabla 3. Límites de calidad zonales.....	41
Tabla 4. Cuadro resumen de sistemas de mitigación.....	74
Tabla 5. Costes medios de instalación y mantenimiento de sistema de mitigación de huecos de tensión.....	75
Tabla 6. Índice de preguntas propuestas para identificar vulnerabilidades.....	78
Tabla 7. Ejemplo de distribución de apariciones de hueco de tensión.....	84
Tabla 8. Resumen de las opciones contempladas en el caso ejemplo.....	88
Tabla 9. Resumen de recursos humanos empleado en el proyecto.....	89
Tabla 10. Costes de realización del proyecto.....	90

# Capítulo 1. Introducción y objetivos

## 1.1 Introducción

En el pasado, las inversiones en las redes eléctricas (transporte y distribución) se adoptaban casi exclusivamente con el objetivo prioritario de asegurar la continuidad de suministro. La creciente aparición de elementos electrónicos cada vez más sensibles y el uso generalizado de ordenadores en el ámbito industrial ha hecho necesario redefinir las pautas de actuación por parte de empresas eléctricas y consumidores, y así empezar a hablar de calidad del servicio, calidad de onda o calidad del producto.

La calidad del servicio se define como el conjunto de características, técnicas y comerciales, exigible al suministro eléctrico por parte de consumidores y por los órganos competentes de la Administración [1]. En el apartado técnico debe cumplir dos puntos diferenciados, por un lado la continuidad del suministro, y por el otro la forma de onda de la potencia suministrada debe ser senoidal, correctamente definida por su amplitud y su frecuencia.

Dentro de toda la gama de posibles faltas, la que más reportes causa son los huecos de tensión [2]. Incidencias en el suministro que provocan una caída de tensión durante un corto espacio de tiempo, produciendo pequeños picos de intensidad o deformaciones de la onda de tensión capaces de parar procesos industriales o borrar memorias de maquinaria especializada.

Estas incidencias surgen por faltas en la red, por cortocircuitos aleatorios producidos por flora y fauna, por causas meteorológicas, por un mantenimiento incorrecto de la aparamenta, o por operaciones en el lado de los clientes, por ejemplo, con la conexión de grandes motores [2]. Constituye un componente aleatorio, inherente al servicio, que hace que no sea posible prever, o evitar, su aparición por completo.

Estas perturbaciones conllevan pérdidas económicas en el cliente, siendo especialmente cuantiosas en el sector industrial. Con este PFC se buscará establecer ciertas pautas por parte de la empresa suministradora de energía eléctrica y por parte del cliente para reducir el número de huecos de tensión, o, en caso de no ser posible, mitigar su efecto.



## 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto se centra en el estudio y caracterización de los huecos de tensión, cómo se originan y el impacto en los consumidores, en particular en los industriales. Se detallarán otras perturbaciones con el fin de conocer el ámbito de la calidad de suministro.

Se facilitará el estudio del impacto económico, y el coste de su mitigación, que tienen los huecos de tensión en la industria estableciendo una serie de protocolos que permitan el análisis de inversión de forma individualizada para cada caso.

## 1.3 Estructura del documento

En el capítulo dos de este documento se realiza una introducción al sistema eléctrico, describiendo las diferentes funciones que hay establecidas, sus características, y exponiendo los operadores y agentes que funcionan en España.

En el capítulo tres se define el término "calidad de suministro", se darán algunas pautas sobre las posibles perturbaciones que se pueden producir en la red eléctrica y se expondrá el objeto de estudio de este proyecto, los huecos de tensión.

En el capítulo cuatro se presenta la teoría sobre huecos de tensión, se clasificarán atendiendo a sus parámetros y se resaltarán sus peculiaridades. Así mismo, se atiende a la información sobre la calidad de la red para estudiar cómo y dónde se producen las faltas con el fin de buscar soluciones más específicas a los problemas más habituales.

En el quinto capítulo del documento se expondrá la normativa referente a la calidad de onda. Esta regulación servirá como punto de partida para buscar soluciones adecuadas que cumplan con la legislación vigente.

El sexto capítulo recoge el efecto de los huecos de tensión en los elementos industriales básicos cómo son motores y transformadores. Este capítulo servirá de base para el estudio de impacto económico.

El capítulo siete está centrado en el impacto económico directo de los huecos de tensión en varias industrias básicas del país, con el fin de estudiar si las medidas adoptadas son oportunas, concienciar de la importancia económica de tener una buena calidad de servicio eléctrico y hacer partícipes de las soluciones tanto a la empresa suministradora como al consumidor industrial.

El octavo capítulo expondrá posibles soluciones técnicas tanto desde el lado del suministrador como desde el del cliente con el fin de mitigar los efectos de los huecos de tensión. Se presentará cada sistema por separado para ofrecer una mayor comprensión del estado del arte de las técnicas y métodos existentes.

En el capítulo nueve se elabora un breve protocolo de actuación para normalizar los estudios de costes e inversión en mitigación de huecos de tensión.

En el capítulo diez se presenta un caso concreto y se hace un breve estudio económico de las posibles decisiones.

En el capítulo once se detalla el presupuesto básico de este proyecto, se detallarán los medios usados y la planificación necesaria para su realización.

Finalmente, en el capítulo doce, se expondrán las conclusiones sobre el proyecto y se dibujarán varias líneas para futuros proyectos.

## Capítulo 2. Sistema Eléctrico

Es el conjunto de agentes e infraestructuras que hacen posible el suministro eléctrico desde las propias centrales donde se genera hasta el cliente final que la consume. La energía eléctrica sigue un proceso parecido al de cualquier otro producto de consumo, pero su gestión es especialmente compleja debido a la inviabilidad de su almacenamiento a nivel práctico.

Esta peculiaridad, junto al compromiso de un suministro constante y de calidad, conlleva la necesidad de coordinación de todos los agentes y la logística de tener en todo momento sistemas de respaldo, centrales en espera listas para empezar a funcionar o para incrementar su producción en plazos muy cortos de tiempo.

En la figura 1 se plantea un esquema simplificado del funcionamiento del sistema eléctrico.

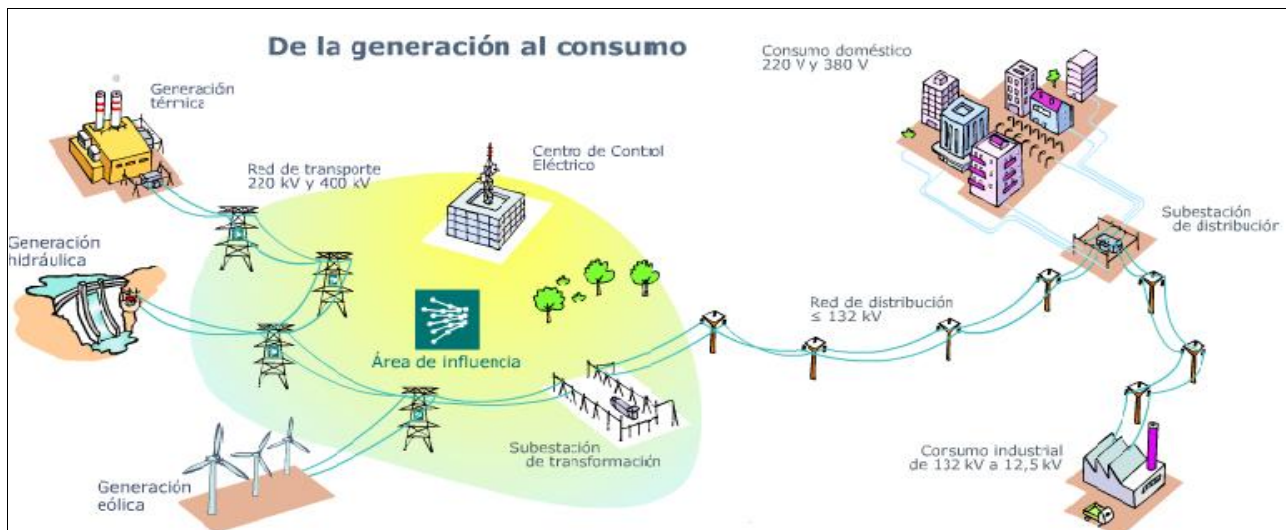


Figura 1. Esquema del sistema eléctrico. Fuente: [www.ree.es](http://www.ree.es)

### 2.1 Características de generación y consumo

El sistema eléctrico español está conectado con Francia, Portugal y Marruecos, siendo España netamente exportadora, es decir, se vende más potencia de la que se compra.

El mix de producción que satisface la demanda incluye tecnologías de generación convencionales, cómo pueden ser las centrales nucleares o de carbón, y energías renovables, cómo las eólicas o hidráulicas. El hecho de que estas últimas dependan de la climatología dificulta un estudio estadístico para evaluar su evolución a largo plazo, mostrando diferencias apreciables en el porcentaje de contribución anual.

A fecha de 21 de Diciembre de 2012, la potencia demandada durante dicho año ascendió hasta los 252.191 Gwh, un 1,2% menos que durante el año 2011 [1] debido al contexto de crisis económica. La generación que cubrió esta demanda se reparte de la siguiente forma:

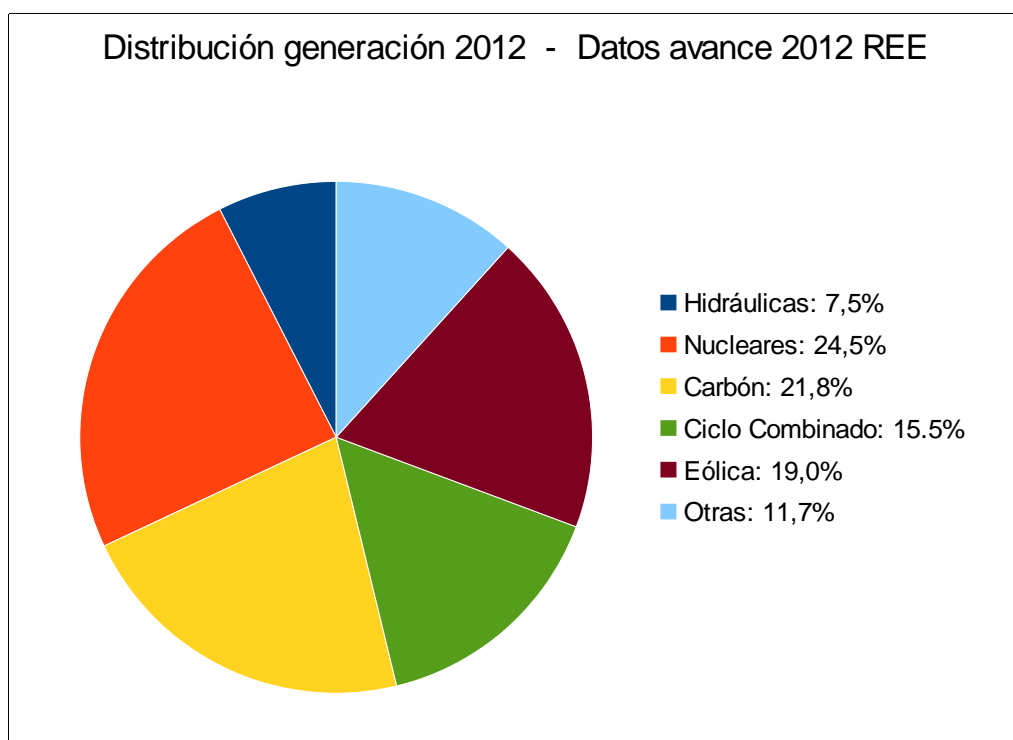


Figura 2. Diagrama de reparto porcentual de la generación eléctrica por tecnologías.

Datos: avance 2012 Red Eléctrica Española.

Para transportar la energía producida a largas distancias y conectar los puntos de generación y los puntos de distribución se usa la red de transporte. Sus valores de tensión se denominan “muy alta tensión” y en España se corresponden con los niveles de 220 y 400 kV. Su longitud a finales de 2012 sumaba 38.553 km de circuitos instalados.

Una vez la energía llega a las subestaciones de transformación, se disminuye la tensión hasta los 132 kV, o tensiones menores, y se canaliza por la red de distribución, que cuenta con unos 700.000 km de circuitos de tendido eléctrico. Finalmente, desde las subestaciones de distribución se alimentan a los consumidores, bien en Alta Tensión (AT) ( $> 1\text{ kV}$ ) o en Baja Tensión (BT) ( $< 1\text{ kV}$ ). Los grandes clientes industriales están conectados normalmente desde el 45 kV a los 400 kV. Los consumidores domésticos lo están en BT.

## 2.2 Agentes del sistema

**Productores:** Tienen la función de generar energía eléctrica, así como la de construir, operar y mantener las centrales de producción. Se considera productor tanto a las grandes compañías tradicionales con centrales de gran potencia, cómo a los pequeños productores particulares.

**Operador del mercado:** Cada día se organizan subastas en las que se cotejan ofertas de compra y venta de energía. De esta forma se establece el régimen de producción diario, seleccionando qué centrales producen y cuales quedan en espera. A partir del 1997, con la ley 54/1997 de 27 de noviembre del Sector Eléctrico, esta gestión queda a cargo de la empresa OMEL (actualmente, parte de OMIE).

**Operador del sistema:** El equilibrio continuo exigido entre producción y consumo de electricidad hace que la producción eléctrica tenga que estar supervisada. El operador del sistema se encarga de garantizar la continuidad y seguridad del suministro eléctrico y la correcta coordinación entre producción y transporte. La operación del sistema recae en Red Eléctrica de España, en su función de operador del sistema.

**Transportista:** Tiene la función de transportar energía eléctrica, así como de construir, mantener y maniobrar las instalaciones de la red transporte. La legislación establece un único transportista, cuya figura recae igualmente en Red Eléctrica de España.

**Distribuidores:** Tienen la función de distribuir energía eléctrica, así como construir, mantener y operar las instalaciones de distribución destinadas a situar la energía en los

puntos de consumo.

Comercializadores: Son aquellas sociedades mercantiles que, accediendo a las redes de transporte o distribución, adquieren energía para su venta a los consumidores.

Consumidores: Son las personas físicas o jurídicas que compran la energía para su propio consumo.

## Capítulo 3. Calidad de suministro

### 3.1 Introducción

La calidad de suministro debe cumplir unos parámetros determinados por la normativa que se reflejan en la continuidad del suministro y en su forma de onda.

La continuidad del suministro viene definida por el número de interrupciones que sufre la red de distribución y la duración de las mismas. Se entiende por interrupción cuando la tensión en los puntos de suministro no supera el 1% de su valor nominal.

La forma de onda de tensión debe ser sinusoidal, con una amplitud y frecuencia determinadas (figura 3). Variando la amplitud, la frecuencia, o ambas, se producirán deformaciones en la onda y aunque el suministro no se interrumpe, un defecto en la forma de onda afectará a determinado tipo de cargas sensibles a ese defecto [3].

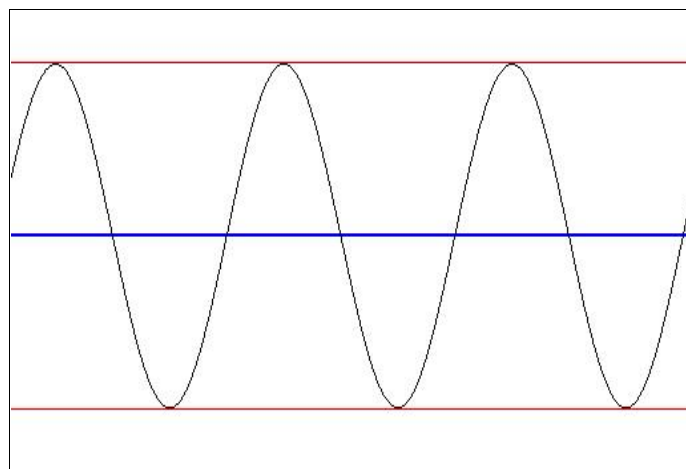


Figura 3. Forma de onda sin defectos

Sólo puede considerarse perturbación si los parámetros quedan fuera de los rangos establecidos en la normativa específica que se aplique. En este capítulo, para homogeneizar los criterios, se usará la norma UNE-EN 50160, “Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución”, de Marzo de 2011.

## 3.2 Tipo de perturbaciones

Existen varios tipos de perturbaciones atendiendo a los parámetros de la señal, aunque en general no es necesario medir la totalidad de estas ya que pueden agruparse en cuatro categorías según afecten a la amplitud, forma de onda, frecuencia o simetría de la tensión. Se estudiará con cierto detalle cada una de las más importantes:

- Cortes de tensión o interrupciones.
- Huecos de tensión.
- Variación de tensión.
- Armónicos e interarmónicos.
- Sobretensiones temporales.
- Picos de tensión.
- Fluctuaciones de tensión.
- Desequilibrios de tensión.
- Variaciones de la frecuencia de alimentación.
- Tensión continua en las redes alternas.
- Tensión de señalización.

Los próximos puntos detallarán las más habituales, y sus causas.

### 3.2.1 Cortes de tensión (o interrupciones)

Según la UNE-EN 50160, existe una interrupción de la alimentación cuando la tensión en los puntos de suministro es inferior al 1% de la tensión declarada. Se considera que existe una interrupción en el suministro eléctrico a un cliente cuando abre uno de los elementos de corte que alimenta a dicho cliente.

En la figura 4 se muestra el esquema de un cliente conectado en el extremo de una línea de media tensión. La apertura de cualquiera de los tres interruptores, del seccionador o la fusión del fusible supone la desconexión de una parte de la red.



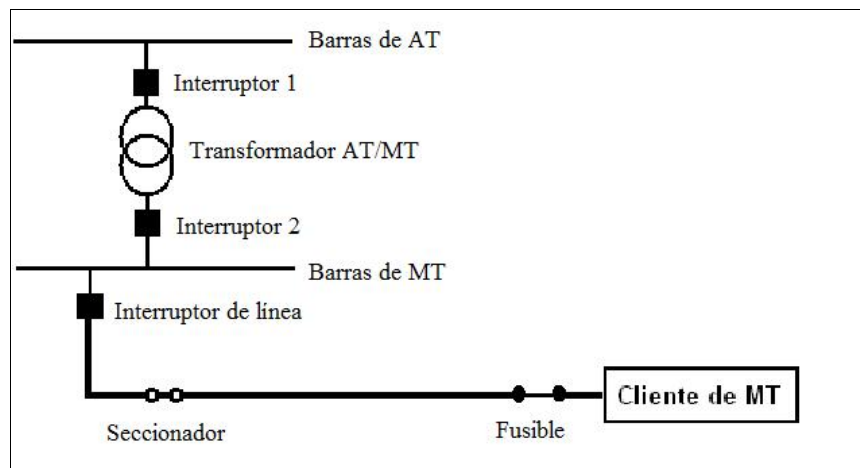


Figura 4. Esquema de la conexión de un cliente a la red de MT

En cualquiera de los casos se produce una interrupción en el cliente hasta que se reponga la tensión cerrando o sustituyendo el elemento de corte.

Si se trata de una interrupción anunciada, prevista por la empresa suministradora y previo aviso a los clientes afectados, se puede paliar su efecto reorganizando los procesos más sensibles. Si el tipo de maniobra lo permite se puede recurrir a la realización de “trabajos en tensión”, una manera de mantener la continuidad del suministro eléctrico en muchas de las labores de mantenimiento de las compañías eléctricas. Sin embargo, existen trabajos que no pueden realizarse con tensión en las líneas por motivos de seguridad. En estos casos es necesario aislar el tramo en el que se realizan los trabajos, lo que da lugar a interrupciones en aquellos suministros que disponen de un solo punto de alimentación.

Las interrupciones accidentales son debidas mayoritariamente a cortocircuitos que suceden en la red y, de forma muy poco frecuente, por sobrecargas. Los cortocircuitos son despejados por el sistema de protecciones, mediante el interruptor de la línea en falta o el fusible. De esta manera se extingue el arco eléctrico y se evitan daños permanentes en las instalaciones.

Las causas de los cortocircuitos son diversas, aunque pueden dividirse en dos categorías:

1) Incidencias que afectan al aislamiento de las líneas: Dependen en gran medida de las características del lugar. En zonas rurales o semiurbanas las líneas son principalmente aéreas y existen riesgos debidos a caídas del arbolado, o la presencia de grandes aves. En

zonas próximas al mar la salinidad puede afectar al aislamiento, mientras un nivel de contaminación excepcional puede ser un factor de riesgo en algunos puntos concretos. Independientemente de su emplazamiento, cualquier línea aérea puede verse afectada por fuertes vendavales. En zonas urbanas las líneas suelen ser subterráneas; en estos casos el número de faltas es menor aunque los daños suelen ser permanentes, y normalmente se debe a una rotura o fallo del aislamiento.

2) Aparición de sobretensiones que superan el aislamiento de la red: La causa principal son los rayos, que causan sobretensiones transitorias que pueden llegar a millones de voltios. Las tormentas son la principal causa de cortocircuitos en las redes aéreas de media tensión. Otra causa probable de sobretensiones son las maniobras en redes, aunque suponen un riesgo menor.

### **3.2.2 Huecos de tensión**

Cómo se verá en el capítulo siguiente, no hay un consenso claro sobre la definición de Hueco de tensión. Según la norma vigente UNE-EN 50160, “un hueco de tensión es una disminución brusca de la tensión de alimentación a un valor situado entre el 90% y el 1% de la tensión declarada, seguida de un restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo. Por convenio un hueco dura entre 10 ms a 1 min. La profundidad de un hueco de tensión es definida como la diferencia entre la tensión eficaz mínima durante el hueco de tensión y la tensión declarada. Las variaciones de tensión que no reducen la tensión de alimentación a un valor inferior al 90% de la tensión declarada no son consideradas como huecos de tensión”.

Para calcular esta duración se considera que el hueco comienza en el momento en que el valor eficaz de la tensión cae por debajo del umbral establecido para la medida de huecos y que termina cuando recupera el valor normal.

En la figura 5 se muestra el ejemplo tomado para ilustrar la normativa, una línea trifásica que sufre huecos de tensión en las tres fases de forma simultánea. En la primera figura podemos ver la representación de la forma de onda, en la segunda, la representación de la tensión eficaz.

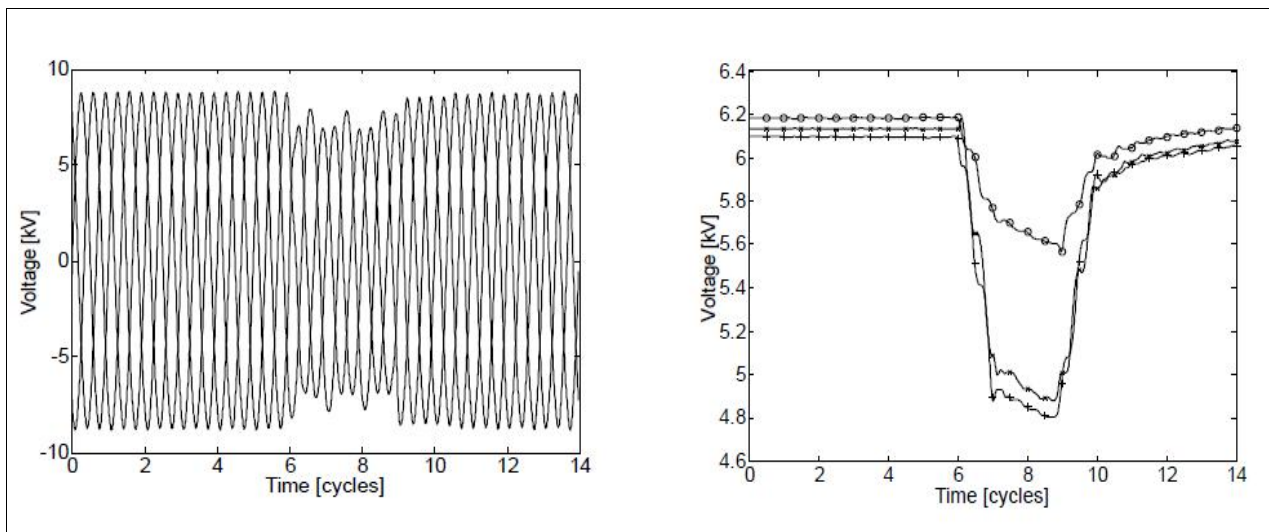


Figura 5. Ejemplo de huecos de tensión establecidos en la norma vigente UNE-EN 50160

La causa principal de los huecos de tensión son las faltas (generalmente cortocircuitos) en líneas eléctricamente próximas. La corriente durante un cortocircuito es muy elevada, sólo limitada por la impedancia de la red hasta el punto de la falta. Este cortocircuito es despejado por el interruptor de cabecera de la línea, en un tiempo que oscila normalmente entre 60 milisegundos y 1 segundo. Durante ese tiempo la tensión en el punto de la falta desciende prácticamente a cero, mientras que en los puntos próximos se producen caídas de tensión proporcionales a la distancia eléctrica a este punto.

En caso de cortocircuito los nodos cercanos transfieren parte de su energía al punto de la falta, retirándola de los puntos eléctricamente próximos, este efecto puede explicar el modo en el que se propagan los huecos de tensión. El concepto de proximidad eléctrica tiene que ver con la impedancia de la red y no tanto con la distancia física a la falta.

### 3.2.3 Variaciones de tensión

Se define la variación de tensión como un aumento o disminución de la tensión provocada normalmente por variaciones de carga.

Si el sistema eléctrico no tuviese cargas, las tensiones en cada punto de la red dependerían únicamente de las relaciones de transformación de los transformadores que

existen en la red. Sin embargo, la conexión de cargas a la red eléctrica produce una circulación de corriente. Es precisamente esta corriente la que produce caídas de tensión, al circular por ella cada una de las impedancias del sistema, debido a las características de las líneas y transformadores. Por otra parte, si la carga fuera constante la caída de tensión en la red también lo sería y en consecuencia no se producirían fluctuaciones de tensión.

Se producen fuertes variaciones de consumo a lo largo del tiempo, existe un componente estacional a lo largo del año y un componente temporal dependiente de los horarios de producción y puesta en marcha de la maquinaria.

En la red eléctrica las variaciones de tensión suelen ser debidas al conjunto de las cargas ya que, individualmente, apenas representan una potencia importante respecto a la capacidad total del sistema. Cuando se refiere a grandes variaciones de carga en un cliente concreto, es muy importante tener en cuenta que cuanto menor es el tamaño del transformador mayor es su impedancia. Por su parte, las líneas presentan más impedancia cuanto menor es su tensión. Desde un punto de vista práctico, esto quiere decir que las impedancias dentro de un cliente son mayores que las de la red, debido a su menor nivel de tensión y dimensiones. En consecuencia, se producen grandes variaciones de tensión dentro de los clientes, que se suman a las que provienen de la red.

### **3.2.4 Armónicos**

La UNE-EN 50160 define la tensión armónica como una tensión sinusoidal cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación.

Cuando se habla de un problema de armónicos, realmente se habla de una distorsión de la forma de onda. Para simplificar el problema de cálculo que supone trabajar con ondas muy complejas se utiliza un desarrollo en series de Fourier tal y como se ilustra en la figura 6: cualquier forma de onda periódica puede ser descompuesta en una onda senoidal de una frecuencia fundamental más una serie de ondas senoidales de frecuencia múltiplo de la fundamental.

Como en Europa, la frecuencia de la tensión eléctrica es 50 Hz, en los cálculos se considera que ésta es la frecuencia fundamental y, en consecuencia, las frecuencias múltiplo son 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, etc. A cada onda de estas frecuencias múltiplo de 50 Hz se le llama armónico. De esta manera, cualquier señal de 100 Hz se considera un 2º armónico (o armónico de orden 2), la señal de 150 Hz sería un armónico 3º y así sucesivamente. La suma (cuadrática) de todos los armónicos se le llama distorsión armónica total.

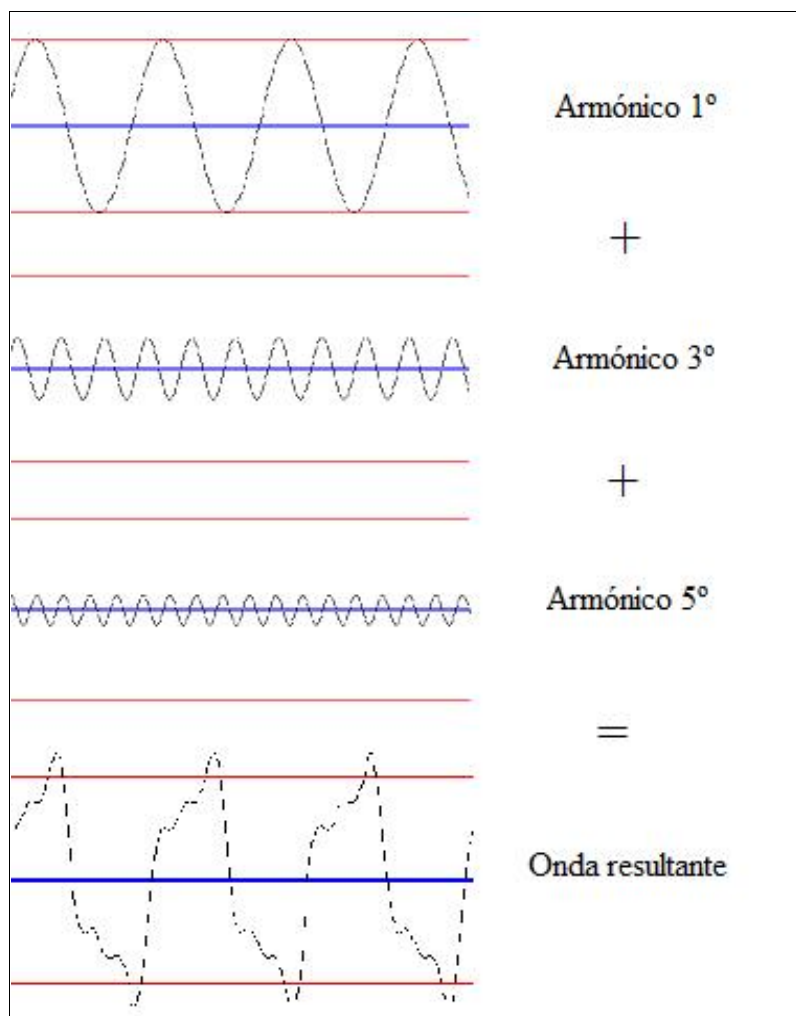


Figura 6. Suma de armónicos en desarrollo de Fourier

Toda señal tendrá armónicos. La cuestión es si los armónicos que contiene nuestra instalación tienen un nivel suficiente para causar problemas a los equipos o procesos. Generalmente son más sensibles los sistemas de comunicaciones o los variadores de

velocidad.

Los equipos eléctricos presentes en diferentes tipos de industria se comportan de manera diversa. Hay equipos muy sensibles a los armónicos y otros prácticamente inmunes, los hay fuertemente generadores de armónicos y otros que los absorben y eliminan. Todos estos equipos se encuentran interconectados entre sí, en mayor o menor grado, a través de la red eléctrica. En estas condiciones, el funcionamiento correcto de una instalación eléctrica se puede considerar una cuestión de equilibrio entre equipos perturbadores y equipos sensibles.

Los generadores que alimentan a la red eléctrica producen una tensión senoidal que se puede considerar pura. Las líneas y los transformadores del sistema de transporte y distribución no distorsionan la tensión. En realidad, los armónicos son producidos por determinadas cargas eléctricas que usan los consumidores. Estas distorsiones se deben a que una parte de las cargas eléctricas no tienen un comportamiento lineal.

### 3.2.5 Sobretensiones temporales

En la norma UNE-EN 50160 se define como "una sobretensión, de duración relativamente larga, en un punto dado". Son, por tanto, el opuesto simétrico de un hueco de tensión respecto a la tensión de referencia, sólo que sin parámetros límite establecidos por la norma.

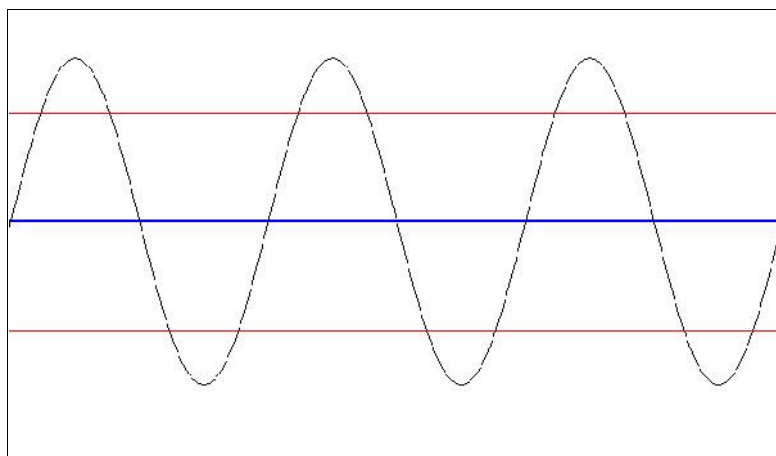


Figura 7: Forma de onda con sobretensión temporal

A este efecto, desde la norma, se establecen valores indicativos de un máximo de 1,7 veces la tensión de referencia para el caso de redes con neutro unido a tierra directamente o a través de una impedancia y de 2,0 veces la tensión de referencia para el caso de neutro aislado. Las sobretensiones temporales se asocian con faltas a tierra en el sistema eléctrico de distribución, y con desconexiones de grandes cargas o conexiones de determinados elementos en la red.

Desde este punto de vista, se podría considerar sobretensión temporal cuando la tensión fuera superior al 110% sobre la tensión de referencia, y su duración tuviera límites análogos a los de los huecos de tensión. Además, las faltas a tierra pueden provocar elevaciones de tensión de la tierra en puntos cercanos a la falta y a la subestación. Cuando la falta se produce en sistemas de MT o AT, esto puede dar lugar a severas sobretensiones temporales en sistemas de baja tensión referenciados a tierra en los puntos que experimentan las citadas elevaciones de tensión de tierra.

Las sobretensiones temporales se caracterizan por su duración y la tensión máxima alcanzada durante el aumento de tensión, en valor porcentual sobre la tensión de referencia.

### **3.2.6 Sobretensiones transitorias**

Según la UNE-EN 50160 corresponde a “una sobretensión oscilatoria o no, de corta duración, generalmente fuertemente amortiguada y cuya duración no excede de algunos milisegundos”.

Por su amplitud y duración, las sobretensiones transitorias tienen que ser analizadas a partir de valores instantáneos de la amplitud de la onda de tensión y no mediante valores promediados. Estas perturbaciones pueden manifestarse en cualquier punto de la red y a cualquier nivel de tensión. A partir de ese punto se desplazan a lo largo de la misma con la misma velocidad de propagación de una onda en un medio conductor. Por ello, en la práctica, suele considerarse que aparecen en todos los puntos de dicha red, en el mismo instante en que son generadas, aunque con parámetros diferentes, especialmente en su valor de pico y, por tanto, en su energía asociada la cual disminuye conforme se aleja la

onda del punto de generación.

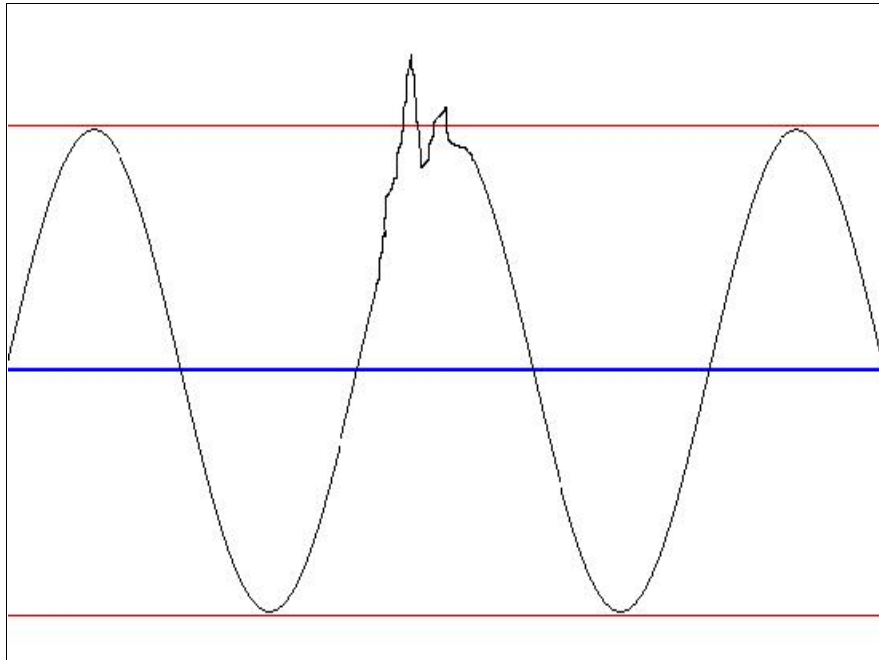


Figura 8. Sobretensión transitoria

Según su forma las sobretensiones transitorias se clasifican en:

- 1) Simples (impulsos): Cuando presentan un frente de subida y otro de bajada, a partir del cual y sin oscilaciones posteriores, la tensión vuelve a su valor normal.
- 2) Oscilatorios: Caracterizados por un frente de subida seguido de oscilaciones que van amortiguándose en un determinado periodo de tiempo.

Los parámetros que caracterizan este tipo de perturbaciones son varios, y la mayoría de ellos tienden más a determinar el posible efecto del impulso y la forma de mitigación que a realizar una descripción formal de la perturbación. Entre ellos destacan los siguientes:

- Valor de pico: Es el valor máximo/mínimo alcanzado. Para impulsos bipolares u oscilatorios, en ocasiones, se establecen tanto el valor de pico positivo como el de pico negativo. Se pueden expresar en valor absoluto alcanzado o como diferencia entre el valor al inicio del impulso y el valor máximo/mínimo.



- **Duración:** Es la diferencia de tiempo entre los instantes inicial y final del impulso. Para impulsos unidireccionales, en ocasiones, la duración se define como la diferencia entre el inicio del impulso y el instante en que su valor decae a un 50% del máximo.
- **Frecuencia:** Este valor define el número de pulsos para un tiempo dado, lo que permite estudiar la oscilación de la onda de tensión durante los transitorios. También es un parámetro que expresa el tiempo de subida de otro tipo de impulsos, al objeto de relacionarlo con el filtro paso bajo que podría atenuarlo.
- **Energía:** Es el valor asociado a un impulso de tensión en una carga o elemento de protección determinado.

Según su origen, en función de la fuente de la sobretensión, pueden clasificarse en sobretensiones de origen atmosférico o sobretensiones debidas a un origen interno.

Las sobretensiones de origen atmosférico están ocasionadas por los rayos que se producen durante las tormentas. Como fenómeno físico un rayo equivale a un impulso de corriente unidireccional, resultado del transvase entre las nubes y el punto de impacto, en un corto periodo de tiempo, con valores máximos comprendidos entre 10 y 250 kA. La forma de onda resultante es muy variada, presentando siempre un frente de ascenso muy rápido, de unos pocos microsegundos, seguido de un descenso más largo que puede durar decenas de microsegundos. Las descargas pueden ser tanto directas, en la propia red, como indirectas, en elementos conectados a la red.

Las sobretensiones debidas a origen interno son las provocadas por cualquier modificación brusca del régimen de corriente establecido en un circuito eléctrico, por conexión o desconexión de cargas o partes del mismo. Si estos eventos se originan en alta o media tensión, generalmente provocan alteraciones de tensión en las redes de baja, que según las relaciones, capacitiva e inductiva del transformador, pueden afectar a los equipos conectados a ellas si no se toman precauciones.

También hay sobretensiones transitorias de amplitud y frecuencias variables, introducidas en la red por los propios usuarios. Se trata en general de fenómenos de poca energía pero que, en muchas ocasiones, presentan un frente de onda brusco, con una cresta que puede alcanzar algunos kV, haciéndolos peligrosos para los equipos sensibles.

### 3.3 Huecos de tensión e interrupciones

Dentro de las perturbaciones explicadas en el apartado anterior hay dos de ellas especialmente relevantes en este proyecto. El estudio pormenorizado de los huecos de tensión, que será más detallado en el capítulo siguiente, hace necesario recurrir a un primer filtro para buscar las diferencias respecto a las interrupciones breves.

En gran parte de la documentación consultada ambos términos vienen relacionados, y sólo ha sido necesario formalizar la diferencia debido a la sensibilidad de los nuevos equipos [2]. Ambas perturbaciones comparten los rangos de tiempo, entre medio ciclo y 1 minuto de duración, y tanto en los huecos de tensión como en las interrupciones breves la perturbación supone una bajada de tensión, generalmente brusca, debido a eventos similares en el sistema de transporte o distribución. Por tanto sólo se diferencian en la profundidad de la caída de tensión.

Se presenta la clasificación de las perturbaciones en función de su duración y profundidad en la tabla 1, un fragmento del anexo 1, “Categorías y características de las perturbaciones en el sistema de potencia eléctrico”:

2.1 Instantáneo		
2.1.1 Interrupción	0,5 - 30 ciclos	<0,1 pu
2.1.2 Hueco de tensión	0,5 - 30 ciclos	0,1 - 0,9 pu
2.1.3 Sobretenensión	0,5 - 30 ciclos	1,1 - 1,8 pu
2.2 Momentánea		
2.2.1 Interrupción	30 ciclos - 3 segundos	<0,1 pu
2.2.2 Hueco de tensión	30 ciclos - 3 segundos	0,1 - 0,9 pu
2.2.3 Sobretenensión	30 ciclos - 3 segundos	1,1 - 1,4 pu
2.3 Temporal		
2.3.1 Interrupción	3 segundos - 1 minuto	<0,1 pu
2.3.2 Hueco de tensión	3 segundos - 1 minuto	0,1 - 0,9 pu
2.3.3 Sobretenensión	3 segundos - 1 minuto	1,1 - 1,2 pu

Tabla 1. Rangos de tiempo y valores de interrupciones, hueco de tensión y sobretenensiones. Fuente: [5]

Se pueden establecer distintos grados de riesgo para cada perturbación en función del daño potencial sobre las instalaciones y los procesos industriales. Existe un consenso en las fuentes consultadas que determinan que las interrupciones tienen una gravedad alta o muy alta, mientras que los huecos de tensión se consideran de gravedad media.

Sin embargo, la probabilidad mucho más baja de aparición de las interrupciones frente a los huecos de tensión conlleva que se consideren a estos últimos como potencialmente más peligrosos [5]. A pesar de su efecto menos grave, su mayor frecuencia de aparición significa un mayor número de paradas de procesos productivos o el aumento de deterioro de las instalaciones.

### **3.4 Consideraciones económicas**

Una primera aproximación suele dar a entender que el coste asociado a un defecto en la red eléctrica se limita a la energía no suministrada durante el incidente. Es cierto que dicho defecto puede suponer un coste de generación no remunerada, además, la empresa suministradora debe afrontar los posibles costes de reparación del deterioro de las instalaciones cuyo fallo han producido el evento.

Pero los costes se extienden al cliente. Interrupciones no programadas o perturbaciones en la señal pueden derivar en la pérdida de eficiencia en procesos sensibles. Una baja calidad de suministro repercute en la vida útil de los equipos (aumento de gasto de reparación o equipación nueva) y dificulta una planificación de mantenimiento productivo (menor capacidad de previsión).

Evaluar el coste de cada tipo de perturbación depende de un estudio pormenorizado de las instalaciones y los procesos afectados, aunque existen ciertas pautas generales que ayudan a establecer un primer borrador. Por ejemplo, las industrias que producen poca cantidad de unidades pero con un desarrollo más complejo son más vulnerables y tienen mayores pérdidas, pues su proceso de producción es más largo y costoso.

## Capítulo 4. Teoría de Huecos de Tensión

En las publicaciones relacionadas con la Calidad del Suministro Eléctrico no hay acuerdo en la definición de hueco de tensión, y aunque son similares, existen ciertos matices que los diferencian. Se tomará como ejemplo la normativa europea y la normativa internacional.

Según la norma europea UNE-EN 50160 el hueco de tensión como: “disminución brusca de la tensión de alimentación a un valor situado entre el 90% y el 1% de la tensión declarada”, seguida del restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo. Por convenio, un hueco de tensión dura de 10 ms a 1 min. La profundidad de un hueco de tensión es definida como la diferencia entre la tensión eficaz mínima durante el hueco de tensión y la tensión declarada. Las variaciones de tensión que no reducen la tensión de alimentación a un valor inferior al 90% de la tensión declarada no son consideradas como huecos de tensión”.

La norma internacional IEEE Std 1159-2009, define hueco como: "una disminución de la tensión o la intensidad, en valor eficaz, entre 0.1 y 0.9 pu a la frecuencia de la red, para duraciones comprendidas entre 0.5 ciclos y 1 minuto".

Como puntos en común se puede destacar que no hay pérdida completa de tensión, en cuyo caso se consideraría interrupción, y la duración del evento (medio ciclo, en Europa, corresponde a 10 ms).

### 4.1 Caracterización de Huecos de Tensión

Para comprender mejor las magnitudes expuestas en el punto anterior, se van a estudiar los parámetros de magnitud y duración por separado. Se utilizará el software de *Alex McEACHERN* (anexo 2), un programa que permite estudiar diferentes tipos de perturbaciones simulados sobre una instalación básica. La facilidad para modificar los datos bajo los que se producen las simulaciones permite ver de forma interactiva el efecto sobre la señal de onda.

Con el fin de obtener una idea clara de los dos parámetros que influyen en los huecos de

tensión se usará en primer lugar un circuito monofásico. En la figura 9 se simula un hueco de tensión con una caída del 60% y una duración de 4 ciclos completos, es decir, 80 ms.



Figura 9. Onda monofásica de tensión con un hueco de tensión del 60% y duración de 80 ms.

#### 4.1.1 Magnitud

Hace referencia a la profundidad del hueco de tensión, es decir, la caída de tensión sufrida durante la perturbación. Hay diversos procedimientos para calcular este valor. La mayoría de los equipos de medición obtienen la magnitud del hueco de tensión por medio de la tensión eficaz. Existen varias alternativas de cuantificación del nivel de tensión durante un evento, por ejemplo, la caracterización de la magnitud de los huecos de tensión puede hacerse también por medio de la magnitud de la componente fundamental de la tensión por medio de un análisis de Fourier, o por la tensión de pico.

#### 4.1.2 Duración

La caída de tensión en las líneas o en los nodos durante un cortocircuito, dentro de los límites establecidos para provocar un hueco de tensión, va a activar las protecciones que tratan de aislar el cortocircuito. Una vez despejada la falla el sistema retomará sus valores originales. La duración de un hueco de tensión es principalmente determinada por el tiempo de despeje, aunque éste puede ser mayor a este tiempo de despeje bajo algunas condiciones.

Generalmente las faltas en los sistemas de transporte son despejadas de manera más rápida que en los sistemas de distribución. Los sistemas de transporte y subtransporte que operan en un sistema de potencia utilizan principalmente protecciones de distancia

(impedancia) y diferencial. En distribución se utiliza más la protección de sobrecorriente.

La definición comúnmente utilizada de la duración de un hueco de tensión es el número de ciclos durante los cuales la tensión cae por debajo de un umbral dado. Si se atiende a las dos normas con las que se abre el capítulo, este umbral se fija en 0.9 pu.

### **4.3 Clasificación de huecos según el tipo de evento**

Para el estudio teórico de los huecos de tensión se han utilizado sistemas monofásicos por su facilidad a la hora de observar los efectos provocados por esta perturbación, pero en los sistemas eléctricos, tanto en transporte, distribución, como la alimentación a las grandes industrias, estos son realizados en trifásica. En los siguientes puntos se estudiarán las líneas trifásicas y el efecto de los huecos de tensión sobre ellas.

La principal causa de los huecos de tensión son los cortocircuitos provocados por faltas en la red, estas perturbaciones crean un hueco de tensión rectangular, con una caída brusca y recuperación rápida de tensión una vez despejada la falta.

Existen otras perturbaciones, el arranque de grandes motores o la energización de transformadores, que generan huecos de tensión de forma no rectangular. La caída de tensión es igual de brusca pero su recuperación es sostenida en el tiempo formando una línea más suave.

#### **4.3.1 Hueco de Tensión debido a faltas**

En los siguientes puntos se muestran ejemplos de diferentes tipos de cortocircuitos, y el efecto sobre la alimentación de la carga. Para el estudio se supone que las 3 fases tienen un desfase de  $120^\circ$ , sin desviaciones del caso ideal.

##### **4.3.1.1 Cortocircuito Monofásico**

El cortocircuito monofásico (contacto de una fase y tierra) supone la mayor parte de cortocircuitos en el sistema.

En la figura 10 se observa un sistema trifásico en el que la fase a (onda sinusoidal roja) ha sufrido un cortocircuito. El hueco de tensión en esa fase tiene una magnitud del 60% y una duración de 80 ms. Las fases b y c no se han visto afectadas por esta falta en la red y por tanto su valor de tensión se mantiene en rango. La línea azul, la potencia que llega a la carga, no se ve afectada.

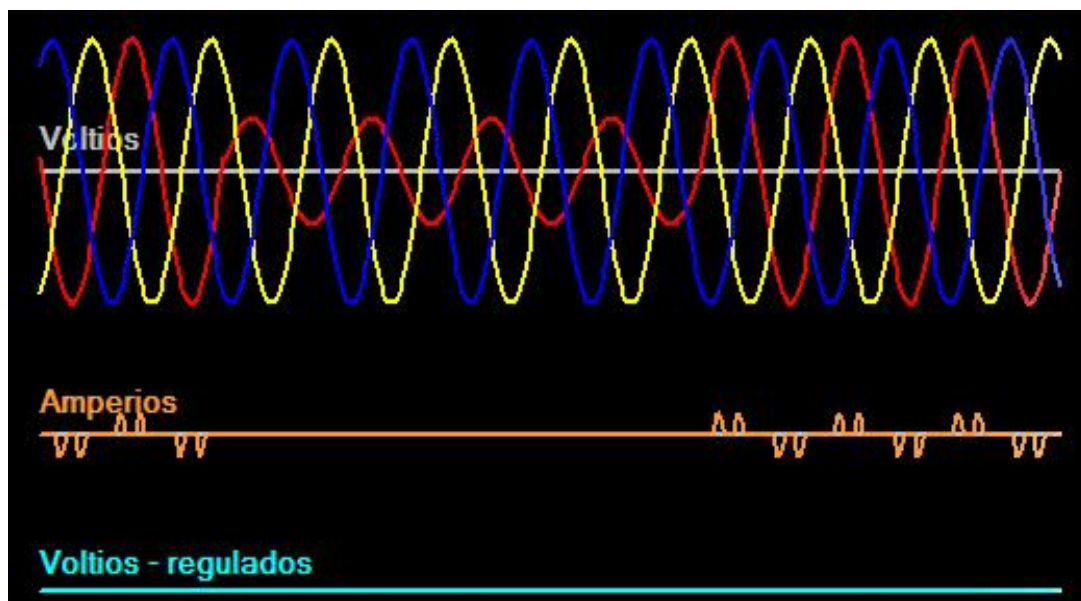


Figura 10. Cortocircuito monofásico en red trifásica, caída del 60% y duración de 80 ms

#### 4.3.1.2 Cortocircuito Bifásico

El cortocircuito bifásico se produce al contactar dos fases entre sí, o dos fases entre sí y a tierra. Este tipo de cortocircuito provoca un desequilibrio de corrientes entre las fases. En el ejemplo, figura 11, se puede observar el incremento de la intensidad que circula por la fase a.

Se considerará el mismo caso que en el punto anterior, una caída del 60% y una duración de 80 ms, esta vez en las fases a y c.

A pesar de la corta duración del evento, en este caso la carga sí sufriría el efecto de los huecos de tensión, y podría afectar a equipos especialmente sensibles como equipos

informáticos o elementos de control, derivando en posibles paradas de equipos que no se hayan visto afectados directamente.

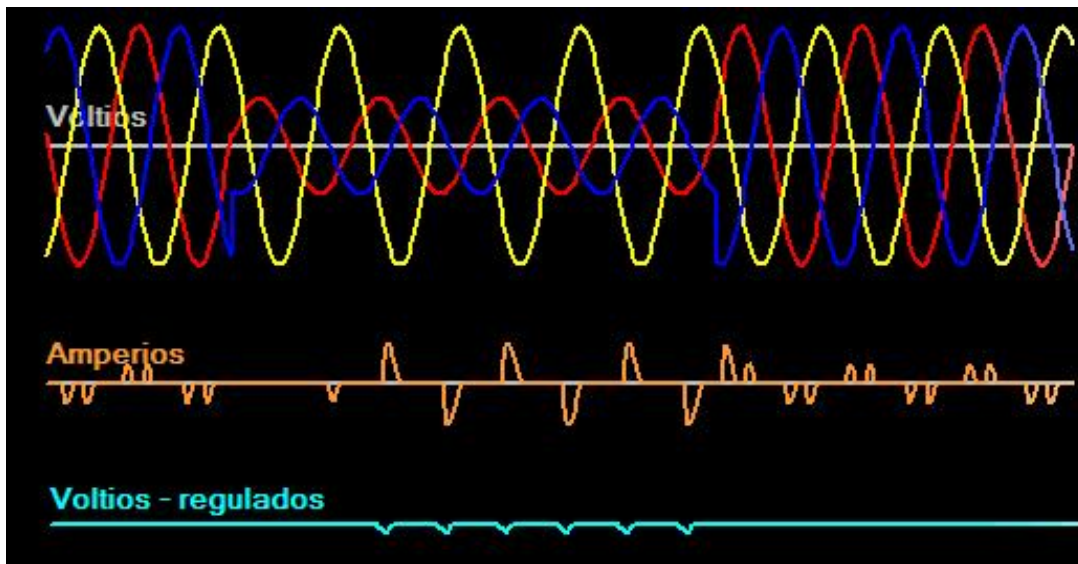


Figura 11. Cortocircuito bifásico en red trifásica, caída del 60% y duración de 80 ms

#### 4.3.1.3 Cortocircuito Trifásico

Este cortocircuito supone que las tres fases tienen contacto entre sí o a través de una impedancia muy baja. Es el más grave que puede darse. Las corrientes de cortocircuito son iguales en las tres fases.

Se considera, al igual que en los puntos anteriores, un hueco de tensión en cada fase del 60% y con una duración de 80 ms.

En la figura 12 se observa que la carga sufre una disminución importante de potencia durante los 80 ms que dura el cortocircuito, esto podría suponer funcionamientos defectuosos, o más probablemente paradas, incluso en equipos más robustos que no se habrían visto afectados directamente en el cortocircuito bifásico.



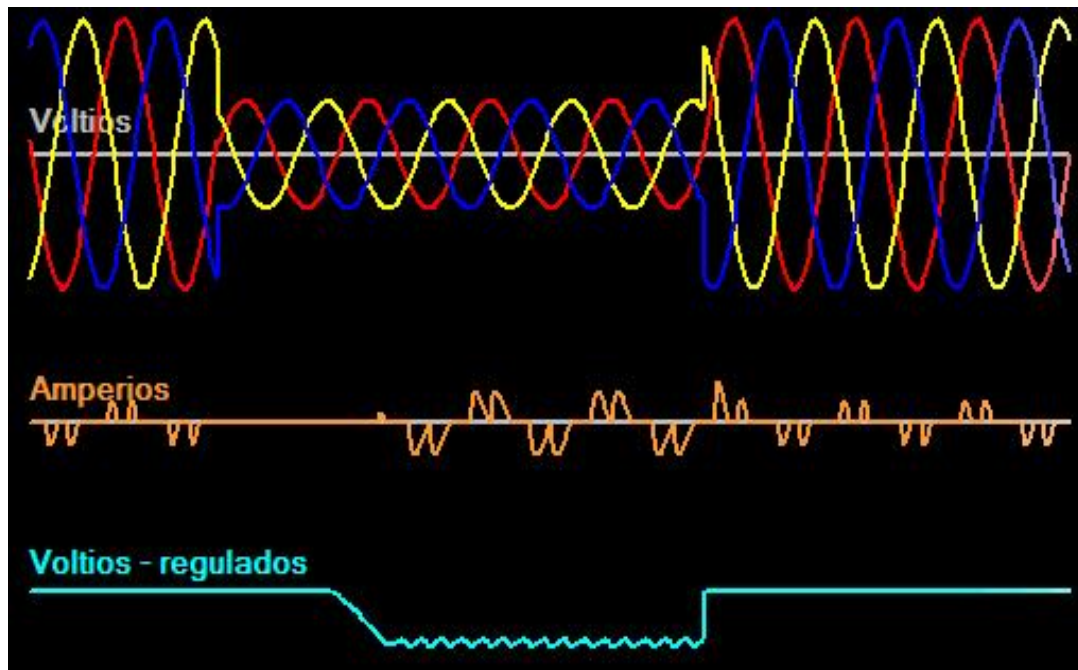


Figura 12. Cortocircuito trifásico, caída del 60% y duración 80 ms

#### 4.3.2 Hueco de Tensión debido a arranque de motores

El arranque de un motor de inducción demanda grandes corrientes, en torno a 5 veces la corriente nominal, y con un factor de potencia muy bajo [6]. Actualmente, para evitar perturbaciones, se limita la demanda de intensidad en el arranque con reóstatos equivalentes según lo establecido en el ITC-BT-47 (Instrucciones Técnicas Complementarias del Reglamento de Baja Tensión). Con el fin de hacer de este documento una posible referencia más allá de nuestra legislación específica, se explica el efecto que tendría el arranque de un motor si no hubiera protecciones que limitasen la demanda de corriente.

A diferencia de las faltas de red, la duración del hueco de tensión está determinado por la inercia de la máquina, una vez alcance el estado estable la corriente disminuye provocando que el hueco de tensión desaparezca. En la figura 13 se muestran los resultados de simulación de un hueco de tensión originado por el arranque de un motor de inducción en un sistema de 13,8 kV.

Esta clase de huecos de tensión se caracterizan por la recuperación de tipo exponencial

que sigue la tensión. Este comportamiento hace que sea clasificado como un hueco de tensión no rectangular [8]. Generalmente, los huecos de tensión producidos por motores son menos severos que los producidos por cortocircuitos en la red eléctrica. El motor de inducción presenta importantes efectos sobre los huecos de tensión, de tal forma que puede modificar la característica rectangular del hueco debido a la generación de un hueco posfalla, producto de la reaceleración de la máquina una vez se da el despeje de la falla generadora del hueco de tensión original [9].

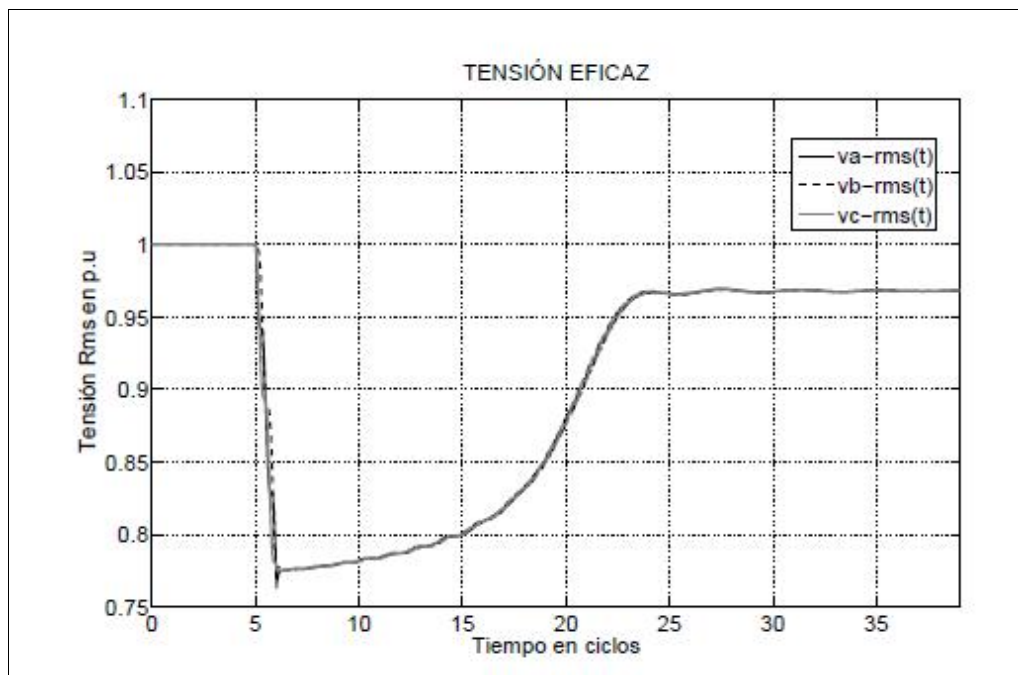


Figura 13. Caracterización del hueco de tensión en rms producido por un motor de inducción. Fuente: [9]

#### 4.3.3 Huecos de tensión debidos a la energización de transformadores

Durante la energización de un transformador se presentan transitorios en el flujo magnético del transformador [8], originándose elevadas corrientes de magnetización en el transformador. En la figura 14 se muestra un hueco de tensión originado por la energización de un transformador.

Una característica importante de los huecos de tensión originados por la energización de

transformadores es el desbalance que se presenta entre las tensiones de fase y el contenido significativo de armónicos de corriente inyectados por el transformador [10]. Esto resulta importante para distinguir entre huecos de tensión originados por la energización de transformadores y huecos de tensión por el arranque de motores de inducción ya que estos últimos, aunque presentan una recuperación tipo exponencial, no inyectan armónicos a la red.

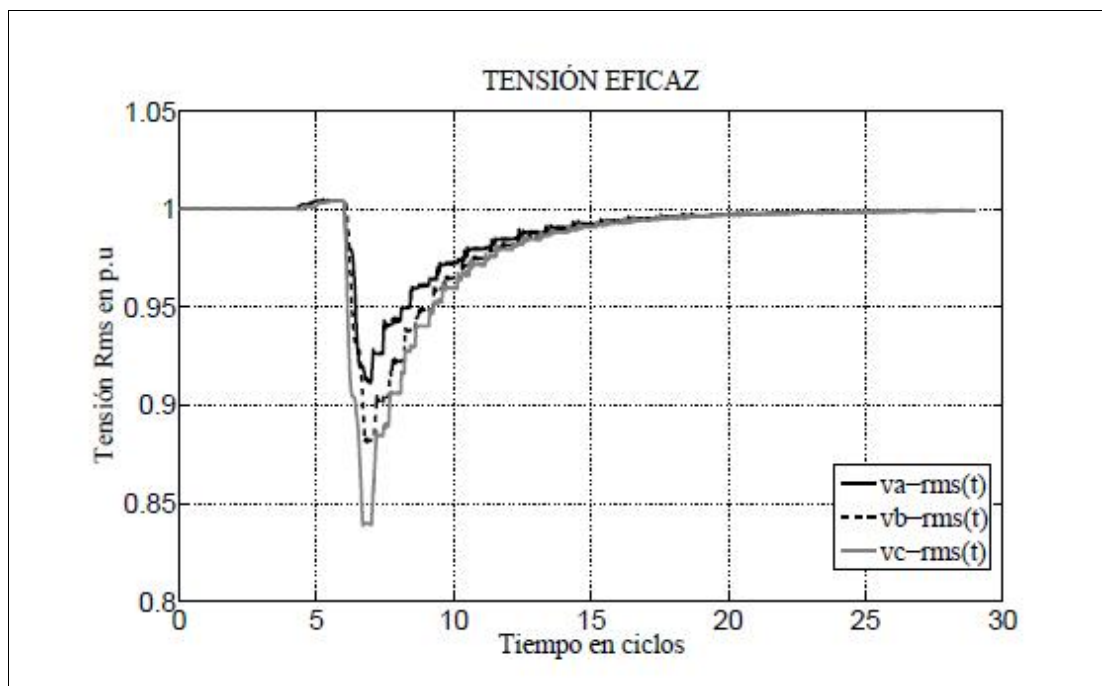


Figura 14. Caracterización del hueco de tensión en rms producido por energización de un transformador conectado directamente a carga. Fuente: [9]

#### 4.4 Clasificación fasorial de huecos de tensión en líneas trifásicas

Se han definido los huecos de tensión producidos por cortocircuitos en líneas trifásicas asumiendo que las fases son ideales y se mantienen a  $120^\circ$  entre sí para facilitar el estudio. Sin embargo, en la clasificación más común de huecos de tensión trifásicos, se añade información respectiva al desfase que se genera durante el hueco [11].

Esta clasificación arroja un resultado de 7 tipos de huecos de tensión, en función del tipo de cortocircuito y de si la carga está conectada en triángulo o en estrella. Esta

información es importante a la hora de estudiar la propagación de los huecos de tensión a través de los transformadores ya que cambiará el tipo de hueco de tensión al pasar del devanado primario al devanado secundario.

Para la finalidad de este proyecto no es necesario profundizar en el desfase de los huecos de tensión en sistemas trifásicos ya que no es necesario hacer este tipo de distinciones a la hora de diseñar una protección adecuada.

## 4.5 Huecos de tensión en serie

Se establece que los huecos de tensión son aleatorios debido a que no es posible predecir su aparición, pero no se distribuyen de igual forma a lo largo del año. Son más frecuentes, por ejemplo, en periodos de clima adverso.

Durante una tormenta podrían producirse dos o más huecos de tensión en un corto periodo de tiempo. En la figura 15 se puede observar la tensión eficaz en dos huecos de tensión consecutivos [12]. En este caso, el primer hueco de tensión es menos pronunciado pero con una duración mayor que el segundo.

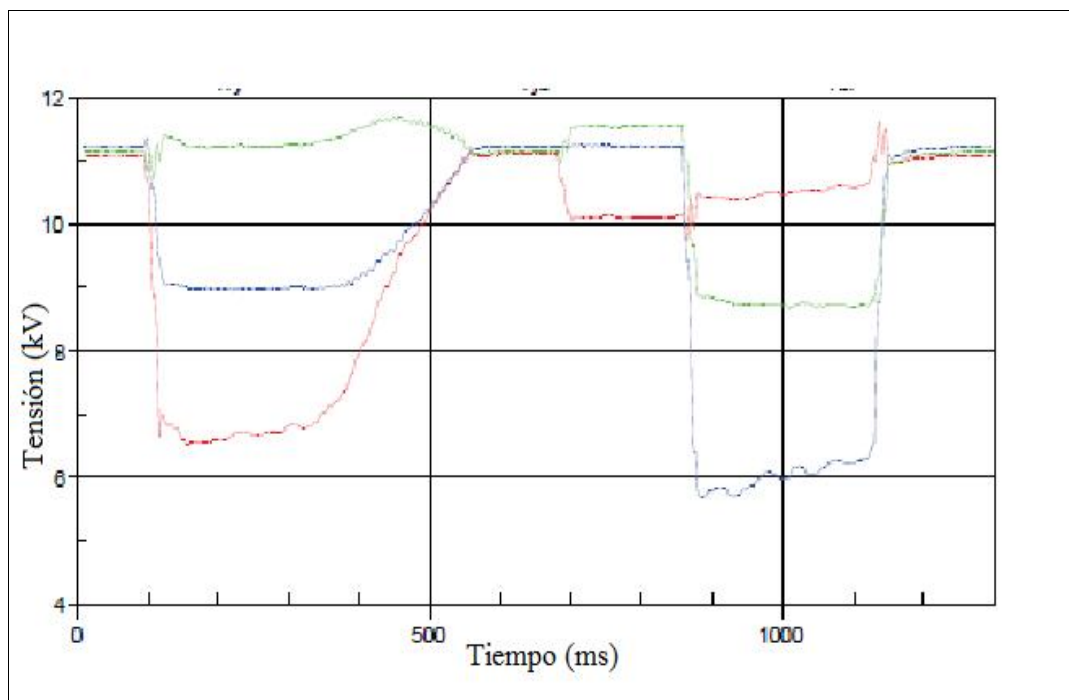


Figura 15. Tensión eficaz en huecos de tensión en serie. Fuente: [12]

En general, el impacto de una serie de eventos es mayor que la suma de impactos de los eventos por separado. Es decir, pueden encadenarse efectos agravando el resultado final.

Cuando sucede esto el estudio de su efecto sobre los equipos requiere especial atención. Un equipo puede soportar cierto hueco de tensión, y sin embargo puede fallar ante un segundo hueco de tensión de igual magnitud y duración que el primero.

También es posible que el primer hueco de tensión tenga suficiente profundidad o duración (o ambas) para hacer fallar el equipo, y el siguiente ya no tenga efecto debido a la actuación de las protecciones. Existe cierto debate sobre cómo tratar este tipo de incidencias en serie, aunque suele optarse por aplicar el efecto de la perturbación más severa.

## Capítulo 5. Normativa de calidad de onda.

La calidad de servicio viene definida en el Real Decreto 1955/2000, de 1 diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica. En particular, los artículos 99 a 110 abarcan las características, técnicas y comerciales, inherentes al suministro eléctrico exigibles por los sujetos, consumidores y por los órganos competentes a la Administración.

Existe un gran desarrollo legislativo en torno a la distribución de energía, tema en el que profundizaremos en este capítulo, mientras que en el servicio de transporte no existen normativas estrictas en temas de calidad de energía.

En el Real Decreto 1634/2006, de 29 de diciembre por el que se establece la tarifa eléctrica a partir del 1 de enero de 2007, se modificaron los límites de calidad individual. Se define la calidad de servicio según los tres aspectos fundamentales que son:

- 1) La continuidad de suministro, relativa al número y duración de las interrupciones del suministro.
- 2) La calidad del producto, relativa a las características de la onda de tensión.
- 3) La calidad en la atención y relación con el cliente, relativa al conjunto de actuaciones de información, asesoramiento, contratación, comunicación y reclamación.

### 5.1 Continuidad de suministro

La continuidad de suministro hace referencia a las interrupciones de más de 3 minutos. De esta manera se contabilizan las interrupciones debidas a faltas permanentes en la red; en el caso de faltas transitorias, los mecanismos de protección y reposición del servicio actúan automáticamente y por lo tanto no computan. La calidad del servicio se clasifica en calidad individual (cada uno de los consumidores) y calidad zonal (referente a un área geográfica).

Para determinar la calidad zonal se distinguen cuatro niveles diferentes según las características de la zona.

Zona urbana: todas las capitales de provincia y los municipios con más de 20.000 suministros.

Zona semiurbana: aquellos municipios con un número de suministros comprendido entre 2.000 y 20.000.

Zona rural concentrada: aquellos municipios con un número de suministros entre 200 y 2.000.

Zona rural dispersa: Conjunto de municipios de una provincia con menos de 200 suministros así como los suministros ubicados fuera de los núcleos de población que no sean polígonos industriales o residenciales.

Con el fin de establecer la calidad individual se controlan tanto el número de interrupciones largas como su duración. La legislación establece un límite de número de interrupciones y de duración total de las interrupciones sufridas por cada consumidor en el transcurso de un año natural dependiendo de la zona en la que esté ubicado y el nivel de tensión al que esté conectado. La tabla siguiente resume los límites reglamentarios establecidos en el último Real Decreto 1634/2006.

	Baja tensión		Media tensión	
	Número de interrupciones	Duración de la interrupción del servicio (horas)	Número de interrupciones	Duración de la interrupción del servicio (horas)
Urbana	10	5	7	3,5
Semiurbana	12	9	11	7
Rural concentrada	16	14	14	11
Rural dispersa	22	19	19	15

Tabla 2. Límites de calidad individual. Número y duración máxima de interrupciones.

Fuente: Real Decreto 1634/2006

Si se excede alguno de estos límites dentro de un año natural, la compañía distribuidora debe compensar al consumidor con un descuento en la facturación de 5 veces el precio estimado de la energía no suministrada (diferencia entre el número de horas de interrupción del consumidor y el número de horas de interrupción reglamentariamente fijado). Las interrupciones programadas y las debidas a causa mayor o causadas por terceros, no se consideran en el cálculo.

En el caso de incumplimiento de ambos índices, prevalece el más ventajoso para el cliente.

La medición de la calidad zonal se efectúa en base a dos índices que son el tiempo interrupción equivalente de la potencia instalada en media tensión (TIEPI) y el número de interrupciones equivalente de la potencia instalada en media tensión (NIEPI).

$$\text{TIEPI} = \frac{\sum_{i=1}^k (PI_i \times H_i)}{\sum PI}$$

Figura 16. Fórmula de TIEPI. Fuente: [www.minetur.gob.es](http://www.minetur.gob.es)

donde:

PI = suma de la potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT (en kVA).

PI<sub>i</sub> = potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT, afectada por la interrupción i de duración H<sub>i</sub> (en kVA).

H<sub>i</sub> = tiempo de interrupción del suministro que afecta a la potencia PI<sub>i</sub> (en horas).

K = número total de interrupciones durante el período considerado.

$$\text{NIEPI} = \frac{\sum_{i=1}^k PI_i}{\sum PI}$$

Figura 17. Fórmula de NIEPI. Fuente: [www.minetur.gob.es](http://www.minetur.gob.es)



donde:

PI= suma de la potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT (en kVA).

$PI_i$  = potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT, afectada por la interrupción "i" (en kVA).

K = número total de interrupciones durante el período considerado.

Cada distribuidor está obligado a mantener los niveles de calidad zonal asignados a aquellas zonas donde desarrollan su actividad, calculados como la media de la falta de continuidad anual del conjunto de municipios agrupados por provincias.

Los límites de NIEPI, TIEPI y percentil 80 del TIEPI vienen fijados por los valores que muestra la tabla siguiente (Real Decreto 1634/2006):

	TIEPI (horas)	Percentil 80 TIEPI (horas)	NIEPI (número)
Urbana	1,5	2,5	3
Semiurbana	3,5	5	5
Rural concentrada	6	10	8
Rural dispersa	9	15	12

Tabla 3. Límites de calidad zonales

Se define percentil 80 como el valor del TIEPI que no es superado por el 80% de los municipios del ámbito provincial definidos. Ningún municipio debe superar este valor por más de dos años consecutivos.

Si las empresas distribuidoras no cumplen con los requisitos de calidad normativos, deben proponer a la Administración competente un programa de actuación temporal que permita la corrección de las causas que originen la falta de calidad. En el caso de que dichos programas no se materialicen o se retrasen, las distribuidoras pueden ser penalizadas. Durante este periodo máximo de 2 años, la falta de calidad individual no es computable.

## 5.2 Calidad de producto eléctrico

La calidad del producto hace referencia al conjunto de características de la onda de tensión, la cual puede verse afectada, principalmente, por las variaciones del valor eficaz de la tensión, por las interrupciones de servicio de duración inferior a tres minutos, por los huecos de tensión, por la tasa de distorsión armónica en tensión y las sobretensiones transitorias.

Las redes de distribución deben desarrollarse de manera a conseguir unas adecuadas condiciones de calidad para el funcionamiento de los equipos de los clientes y al mismo tiempo evitar un innecesario incremento de los costes de la electricidad. Existe un balance económico entre los costes atribuibles a conseguir un entorno electromagnético más beneficioso para el funcionamiento de los equipos conectados a la red de distribución por la mayoría de los clientes y los costes de conseguir inmunidad de los equipos dentro del entorno en el que está previsto su utilización y que directamente serían aprovechados por un cliente particular.

## 5.3 Procedimiento de Operación 12.3

La legislación española presenta una normativa de obligado cumplimiento para la operación de parques eólicos registrados a partir del 1 de enero de 2007. Este procedimiento, el PO 12.3, establece unos parámetros de calidad en la generación de energía eólica para su inyección en la red eléctrica.

El presente documento está centrado en el impacto de los huecos de tensión en el consumo pero es necesaria, aún sin profundizar, la mención del control que se realiza en la generación para una comprensión más global del problema.

La normativa pretende tomar medidas de diseño y control necesarias para que los generadores no se desconecten durante los huecos de tensión debidos a cortocircuitos correctamente despejados. Para ello fija una curva de tensiones admisibles, figura 18, en las que no deberán producirse desconexiones.

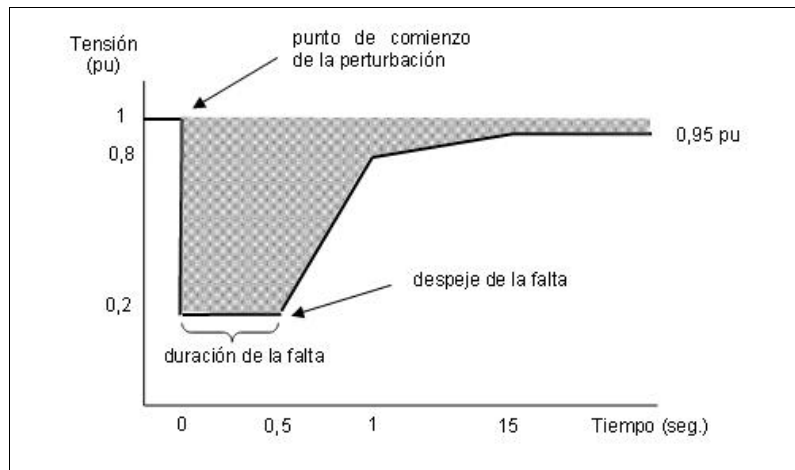


Figura 18. Curva tensión-tiempo que define el área del hueco de tensión.

Todo hueco de tensión que se enmarque dentro de los parámetros que definen la zona gris deberá poder ser soportado sin producir desconexiones. Se busca que las centrales eólicas sean más robustas y sufran menos perturbaciones que puedan inducir a su mal funcionamiento y que produzcan, a su vez, perturbaciones a la propia red.

## 5.4 Normativa específica para medir huecos de tensión.

En la normativa UNE-EN 61000-4-30, "Técnicas de ensayo y de medida. Métodos de medida de la calidad de suministro", actualizada en 2009, se exponen los procedimientos para medir las perturbaciones electromagnéticas en la red.

Cómo ya se ha establecido en el capítulo 3 y el capítulo 4, es necesario obtener el valor de la tensión, en forma de onda senoidal o en valor eficaz para determinar los huecos de tensión. Para ello es preciso hacer la medida con un registrador trifásico entre fase y fase.

Existen varios modelos comerciales de registradores de huecos de tensión, a modo de ejemplo se puede citar el modelo AIRE – VDA II, que consta de un hardware clase A (según UNE-EN 61000-4-30) y un software que permite procesar los ficheros registrados para su análisis en caso de que se produzca una falta eléctrica. Al ser un modelo concebido para el mercado español, está configurado para responder a los requerimientos normativos específicos de dicho mercado.

Una de las características más importantes para la utilización de un registrador es su rapidez de respuesta para ser capaz de obtener, de manera continua, al menos un valor eficaz de tensión cada ciclo (20 milisegundos). Todo ello para cada una de las fases. La medición arrojará un resultado de gran complejidad, por lo que es necesaria una simplificación del resultado:

a) Generalmente se acepta que existe un hueco de tensión cuando cualquiera de las fases, aunque sólo sea una, cae por debajo del umbral establecido. Es decir que aunque afecte a una, dos o las tres fases se considera un hueco único.

b) Un hueco de tensión se define con su momento de inicio, considerado como el momento en que la tensión cae por debajo de los márgenes normales, y la profundidad y duración en el peor de los casos: Profundidad de la fase con mayor caída y duración de la fase que permanece más tiempo por debajo del límite.

A pesar de que la norma UNE-EN 50160 en la versión 2001 está desfasada, es interesante recuperar uno de los parrafos que citaba dando algunos datos indicativos que muestran la dificultad de hacer predicciones sobre este tipo de eventos:

*“En condiciones normales de explotación, el número esperado de huecos de tensión en un año puede ir de algunas decenas a un millar. La mayor parte de los huecos de tensión tienen una duración de menos de un segundo y una tensión retenida superior al 40%. Sin embargo a veces pueden producirse huecos de tensión de una profundidad y duración superior. En ciertos lugares, es frecuente que se produzcan huecos de tensión con una tensión retenida entre el 85% y el 90% de  $U_n$ , que están provocados por conmutaciones de carga en las instalaciones de los usuarios de la red.”*

Actualmente se ha optado por un término más general, y en la versión vigente indican:

*“En condiciones normales de explotación, el número esperado de huecos de tensión en un año puede ir desde varios hasta muchos casos, con diferentes características”*

Al igual que las interrupciones breves, los huecos de tensión son unas perturbaciones cuyo origen principal son las faltas que sobrevienen en las instalaciones de los usuarios, en la red de distribución o en la de transporte. Son sucesos completamente aleatorios e

imprevisibles. Su frecuencia depende fuertemente del tipo de red y del punto de observación. Su frecuencia depende en gran medida las condiciones meteorológicas del año por lo que su distribución suele ser muy irregular.

## Capítulo 6. Impacto técnico

En este capítulo se estudia el efecto de los huecos de tensión en diferentes tipos de elementos, desde sistemas de iluminación hasta maquinaria industrial tales como transformadores o motores. Se enfoca con una perspectiva más práctica que teórica con el fin de presentar, desde el punto de vista industrial, qué sucede con estos equipos durante un hueco de tensión.

Se pretende conocer cómo actúan aquellos elementos potencialmente sensibles en los procesos industriales. Es necesario conocer su estructura y su reacción, por ello se presenta la curva ITIC-CBEMA en este capítulo, uno de los parámetros de diseño más importantes para ofrecer cierta protección básica desde el propio diseño.

### 6.1 Curva ITIC-CBEMA

La curva ITIC (Information Technology Industry Council), también conocida como la curva CBEMA (Computer and Business Equipment Manufacturers Association), mostrada en la figura 19 describe la tolerancia que puedan soportar los equipos a los diferentes cambios de la tensión. Esta tabla es de especial importancia a la hora de proteger los equipos de control, se creó para ofrecer pautas de protección a los diseñadores de equipos frente a cualquier tipo de perturbación que afecte a los niveles de tensión.

Dispone de 3 regiones diferenciadas:

En la zona normal de funcionamiento, las perturbaciones ocurridas dentro de su rango no afectarán a los equipos. Al enfrentar la duración frente a la profundidad, existe la posibilidad de resistir una variación intensa de tensión durante un muy corto periodo de tiempo o la de sostener en el tiempo una pequeña variación. Permite cierta flexibilidad de funcionamiento.

En la zona “sin daños” el equipo no funcionará correctamente, produciendo algunas anomalías en su resultado, o incluso apagándose por falta de potencia, pero no se verá dañado. Es la zona más común durante los huecos de tensión.

En la zona prohibida el equipo no funcionará correctamente, y además sufrirá daños. Durante sobretensiones de gran magnitud el equipo deberá apagarse para proteger el aislamiento de sus componentes internos.

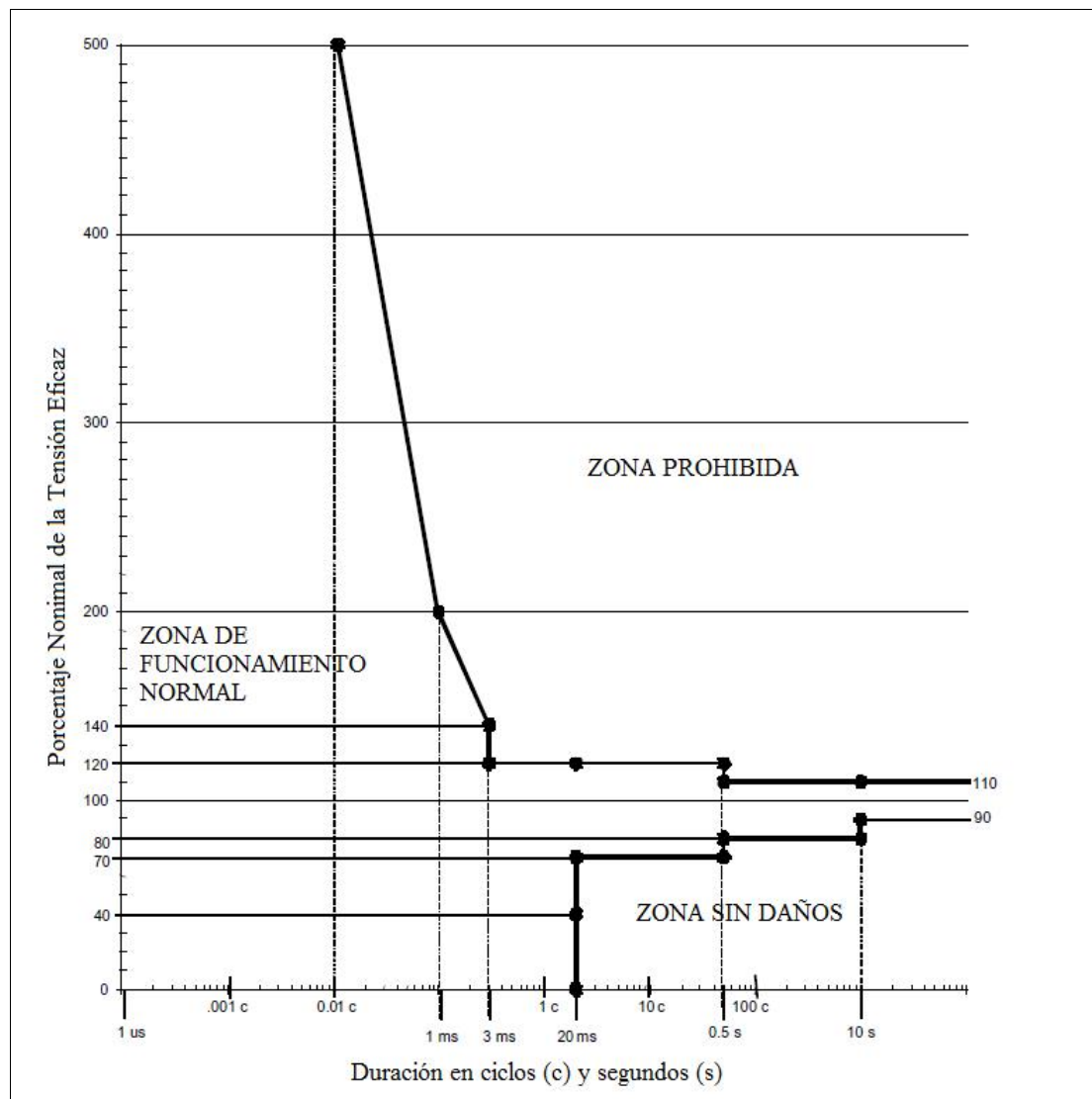


Figura 19. Curva ITIC-CBEMA. Fuente: [3]

Esta curva es tomada como referencia por casi todos los sectores industriales debido a su fiabilidad en los equipos y a la robustez que ofrece al sistema.

Se puede encontrar una versión adaptada, más estricta, en la norma SEMI F47, actualizada en 2006. Esta normativa es específica para la industria de los

semiconductores, donde es de obligado de cumplimiento, debido a que el equipo utilizado para la fabricación de semiconductores es más sensible y conlleva mayores costes. Se estima que la cantidad de pérdidas por huecos de tensión asciende a 150.000 de millones de dólares en EEUU [3].

## **6.2 Impacto sobre sistemas eléctricos comunes**

Un hueco de tensión afecta a todos los sistemas eléctricos de la instalación y, aunque el presente proyecto se centra en aquellos que intervienen directamente en procesos industriales, es interesante comprobar si tiene algún efecto en sistemas más comunes.

Los sistemas de calefacción no suelen verse afectados por los huecos de tensión. Las resistencias, que en incandescencia aportan el calor al sistema, no sufren prácticamente efectos por esta perturbación.

De igual modo, los sistemas eléctricos del tipo iluminación no suelen verse afectados por los huecos de tensión. Únicamente las lámparas de descarga, en el caso de huecos de una profundidad superior al 50%, pueden llegar a apagarse. Una vez recuperada la tensión el encendido puede llevar unos minutos [14].

## **6.3 Impacto sobre elementos de control**

Los elementos de control conforman los sistemas que emiten las instrucciones a la maquinaria industrial.

Son los equipos informáticos, dedicados generalmente al control, los más sensibles a huecos de profundidades mayores al 10%. Los huecos de tensión y las interrupciones breves en estos equipos pueden producir la pérdida de control en una planta de producción, debido a que un hueco en un procesador de control puede originar que interprete erróneamente, o pierda, señales.

Los sistemas modernos requieren de una regulación de tensión mucho más precisa, comparada con la regulación tradicional que se aplica por ejemplo a los motores.



Procesos con control electrónico, sensores y controles de velocidad variables, así como los relés de protección convencionales, tienen un mayor grado de susceptibilidad a los huecos de tensión.

Se profundiza en la importancia de su protección en el capítulo 8 de este documento.

## **6.4 Impacto sobre equipos de potencia**

El otro grupo diferenciado en plantas industriales, a parte de los elementos de control, es el equipo de potencia. Motores y transformadores que requieren altos niveles de energía para funcionar y que son la base de la mayor parte de los procesos productivos.

### **6.4.1 Transformadores**

El efecto más visible observado en los transformadores, debido a la presencia de huecos de tensión, es el del incremento de la corriente. Estos incrementos de corriente, que pueden llevar a saturar el transformador, van a depender del tipo y de las características de los huecos de tensión, así como de los parámetros del transformador y las características de la carga [14].

Estudiando transformadores de 3 y 5 columnas se observa que la corriente se incrementa en las diferentes fases dependiendo del tipo de hueco utilizado para el análisis. En ambos casos el incremento máximo de la corriente alcanza un valor superior a 20 veces en p.u. A mayor profundidad del hueco de tensión, mayor será la intensidad de la corriente.

Los incrementos de la corriente conllevan otros efectos implícitos, como son el aumento de las pérdidas tanto en el hierro como en el cobre y calentamientos suplementarios. A pesar de esto, los transformadores son separadores eficaces, particularmente efectivos para mitigar los huecos de tensión [15].

### **6.4.2 Motores**

Los huecos de tensión están definidos normalmente por la magnitud, variación y la

duración del hueco de tensión. Además de estas cantidades, también son caracterizados por el desequilibrio (asimetría), formas de onda no sinusoidales, y el cambio del ángulo de la fase (salto de la fase).

Los huecos de tensión tienen gran influencia sobre el comportamiento de los motores, más aún si se considera que más del 50% de la electricidad consumida en los países en vía de desarrollo es consumida por los motores.

A nivel industrial conlleva un aumento de coste de la actividad económica debido a la pérdida de eficiencia y al desgaste anticipado.

### **6.4.2.1 Motores de Inducción**

Los efectos más notorios causados por los huecos de tensión, sobre los motores, son la pérdida de velocidad del motor, picos de corriente, picos en el par y aumento de las pérdidas de energía por calentamiento (debido al aumento de la corriente) de los motores de inducción. Por lo tanto, las variables que deben ser estudiadas son la intensidad instantánea, el par instantáneo, y la velocidad instantánea. Muchas veces el efecto será de tal magnitud que se llegue hasta la desconexión de la máquina, causando considerables pérdidas económicas [16] [17].

**Pico de intensidad:** Los cambios súbitos de tensión producidos por los huecos de tensión producen cambios en las máquinas que se pueden considerar, la mayoría de las veces, como transitorios. Dentro de estos cambios esta la disminución del par de la máquina que a su vez, llevan a que se presenten picos en la corriente, que pueden deteriorar el aislamiento de la máquina.

**Picos de par:** A diferencia de lo que sucede con los picos de intensidad, el máximo pico de par no siempre se encuentra en el primer semiperíodo tras la caída de tensión o tras la recuperación de la misma. Una característica observable es que el par oscila durante el hueco de tensión si éste es asimétrico. De otra forma se aprecia el par pulsante como consecuencia a la componente inversa de la tensión [17].

**Pérdida de velocidad mecánica:** Al analizar, en estado estable, el comportamiento de un

motor de inducción ante la presencia de un hueco de tensión (se disminuye súbitamente el valor RMS de la tensión), se puede observar que el par del motor se reducirá proporcionalmente al cuadrado de la tensión existente en los terminales del motor. Si el motor posee una constante de inercia baja, la reducción del par llevará a una desaceleración del motor.

Calentamiento de los motores: La presencia de tensiones desequilibradas, como las que se presentan en los huecos de tensión, producen corrientes de secuencia negativa, que a su vez generan calentamiento en los devanados del estátor y del rotor, incremento en el consumo de energía y pérdida de eficiencia [16].

### **6.4.2.2 Motores síncronos**

La máquina síncrona es una de las máquinas eléctricas más importantes, ya que se utiliza en los sistemas eléctricos de potencia como generador trifásico de tensión.

Los motores síncrónicos pueden soportar huecos de tensión más importantes (del orden del 50%) sin perder apenas velocidad, debido a su inercia, generalmente mayor, a las posibilidades de sobreexcitación y a la proporcionalidad de su par con la tensión.

Si la inercia del motor es pequeña y la duración del hueco es alta disminuye el par motor, que es proporcional a la tensión, y puede perderse el sincronismo. En este caso el motor se para, y hay que volver a realizar el complejo proceso de arranque.

La probabilidad de que esto ocurra es baja, a no ser que el hueco supere el 50%, dada la gran masa inerte que estos motores generalmente poseen y sus posibilidades de sobreexcitación.

Debido a que estos motores suelen disponer de interruptor y relé de mínima tensión, se pueden analizar diferentes efectos de los huecos de tensión sobre el control [17]:

- Contactores en alterna. En su variante más simple y extendida, al poner en marcha el motor, se actúa sobre un contactor, que se autoalimenta. Si la tensión se sitúa por debajo de un determinado nivel durante el funcionamiento normal del

motor, el contactor se activa y el motor se para.

- Interruptores y relés de mínima tensión. Para evitar que tenga lugar el arranque de la instalación entera cuando vuelve la tensión tras un cero, se suele dotar a ésta de relés de mínima tensión o de bobinas de tensión nula, que desconectan motores en función de la profundidad y duración del hueco.

## Capítulo 7. Impacto económico en la industria

Las incidencias de los huecos de tensión a nivel técnico expuesto en el capítulo 6 de este documento están presentes en todo tipo de industrias. A modo de ejemplo se procede a estudiar varios sectores con importancia estratégica en el tejido industrial español, analizando sus procesos de forma particularizada y el efecto de los huecos de tensión sobre ellos. Es esencial estudiar los problemas específicos de cada sector para identificar los costes monetarios de estas perturbaciones.

Los huecos de tensión tienen un alto grado de aleatoriedad, variando su frecuencia y profundidad a lo largo del tiempo y de la localización, por tanto no se puede calcular un coste promedio válido para cada industria. Cada planta debe realizar su propio estudio en función de la red eléctrica local que le suministra potencia, del tamaño de su planta y de la calidad de los equipos e instalaciones.

Se muestran algunos datos meramente orientativos facilitados por "*Copper Development Association*", una organización fundamentalmente encaminada al estudio de la industria metalúrgica del cobre en Europa y en EEUU pero que, en colaboración con autoridades y otras asociaciones, ha llevado a cabo encuestas entre empresas de todos los sectores sobre la calidad de potencia y sus costes particulares.

Más allá de estos datos meramente orientativos y, en algunos casos, desfasados, es difícil encontrar más información al respecto. No existen datos públicos que especifiquen el coste asociado a los huecos de tensión actualmente. Toda la documentación revisada se remite a los datos ofrecidos por "*Copper Development Association*" en 2001 [18].

Esta ausencia de datos puede deberse a una mejora sustancial en los sistemas desde el último estudio llevado a cabo sobre el impacto de la calidad de energía y, por tanto, la sensación de no ser necesario incidir en el tema. Puede deberse a la necesidad de confidencialidad para mantener estrategias industriales y comerciales. O, simplemente, a la ausencia de un estudio coordinado por parte de distribuidores de potencia, clientes industriales y administraciones.

## 7.1 Metalurgia

Este sector tiene una gran capacidad de reciclaje de las piezas defectuosas por culpa de una parada no controlada, por tanto el coste asociado no depende tanto de la materia prima como del tiempo necesario para reiniciar el sistema.

### 7.1.1 Hornos de combustión

Uno de los principales procesos en el sector metalúrgico es la fundición, el tratado del mineral a alta temperatura y presión como preparación previa a su uso industrial. El sistema más usual es la combustión de gas para elevar la temperatura en la cámara donde se funde el mineral. Para maximizar la producción se trabaja en un sistema continuo, donde se suministra mineral de forma constante y se expulsa metal fundido. Este es dirigido por chorros de aire a presión a través de canalizaciones hasta la zona de colada, donde se moldea en forma de lingote.

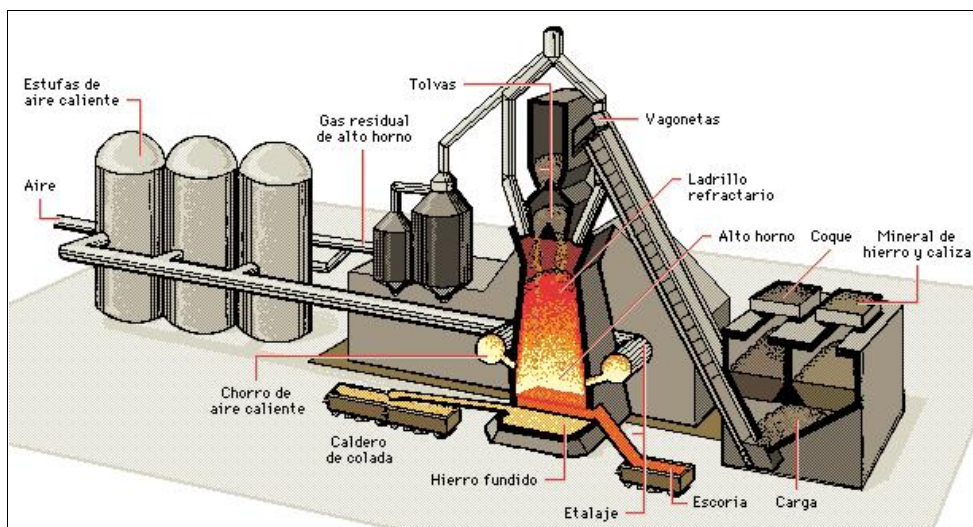


Figura 20. Esquema del proceso de fundido del hierro. Fuente: <http://www.fisicanet.com.ar>

El aire a presión se consigue gracias a un compresor que requiere de un motor conectado a la red. Este motor es el elemento que se puede ver, potencialmente, afectado por un hueco de tensión. Cómo se expuso en el capítulo 6, los motores tienen cierta inmunidad a huecos de tensión cortos o poco profundos gracias a su inercia de giro, pero en determinados casos puede perder velocidad, sufrir picos de intensidad o incluso llegar a

la parada.

En caso de parada del motor la presión en las tuberías puede caer en un tiempo de 15 a 30 segundos, impidiendo el flujo de metal fundido por los conductos y siendo necesaria una parada completa con el fin de extraer el metal. El tiempo necesario varía, en función del tamaño del horno y de la cantidad de carga, desde unas pocas horas hasta un día completo, con un coste medio aproximado de 10.000€/ hora [19].

## **7.1.2 Hornos eléctricos**

En algunos hornos el calor para fundir y refinar el acero procede de la electricidad y no de la combustión de gas. Como las condiciones de refinado de estos hornos se pueden regular más estrictamente, los hornos eléctricos son sobre todo útiles para producir acero inoxidable y otros aceros de aleación que deben ser fabricados según unas especificaciones muy exigentes. El refinado se produce en una cámara hermética, donde la temperatura y otras condiciones se controlan de forma estricta mediante dispositivos automáticos.

En este caso el hueco de tensión no suele afectar directamente al proceso de fundición, ya que las resistencias calefactoras sólo se ven afectadas ante huecos de tensión muy pronunciados con una duración larga, pero los sistemas de control pueden interpretar órdenes erróneas y afectar a la calidad final de producto, lo que requiere reiniciar el proceso.

## **7.1.3 Procesos de laminado**

El acero se vende en una gran variedad de formas y tamaños. El proceso básico de elaboración del acero se conoce como laminado en caliente. En este proceso, el lingote colado se calienta al rojo vivo en un horno y a continuación se hace pasar entre una serie de rodillos metálicos colocados en pares que lo aplastan hasta darle la forma y tamaño deseados. La distancia entre los rodillos va disminuyendo a medida que se reduce el espesor del acero, cómo se ve en la figura 21.

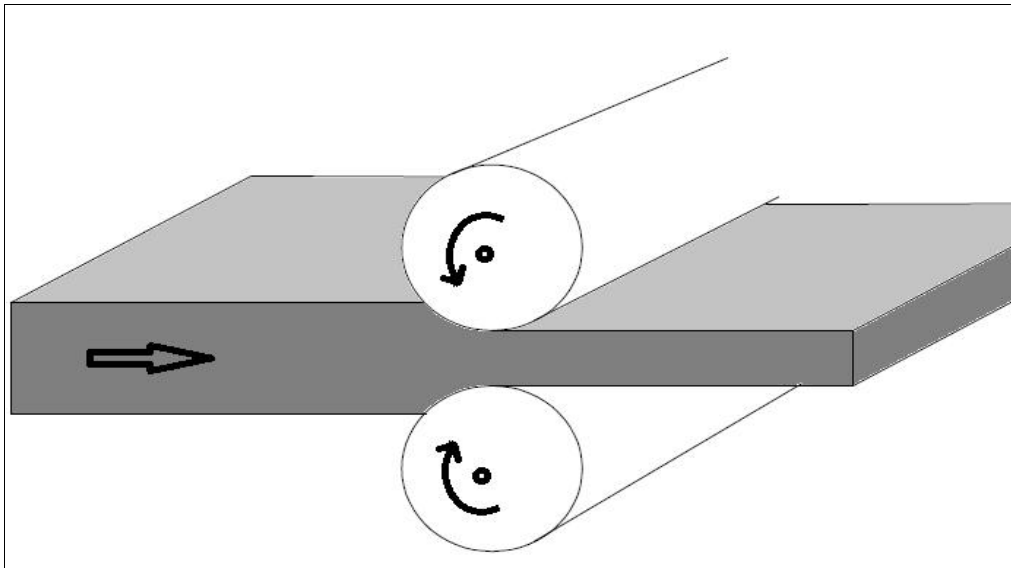


Figura 21. Rodillos girando en el proceso de laminado

Los motores que mueven los rodillos se ven afectados por los huecos de tensión, pudiendo llegar a parar el laminado. El metal se va enfriando, siendo necesaria la extracción de largas piezas metálicas de la cadena de producción, parando la planta durante varias horas.

Esta parada no sólo afecta al tiempo de producción. Los rodillos, refrigerados cuando están en funcionamiento, tienen parte de superficie en contacto con la pieza de metal a alta temperatura, imposible de refrigerar estando estáticos. La extracción y reparación de piezas deformadas toma un tiempo aproximado de 8 horas [19].

La figura 22, una imagen de una función real del Reino Unido, ilustra sobre la envergadura de la maquinaria usada y la complejidad de tratar el producto resultante.



Figura 22. Laminado al rojo vivo. Fuente: [www.boschrexroth.co.uk](http://www.boschrexroth.co.uk)



## **7.2 Industria del automóvil**

Este sector se caracteriza por la necesidad de coordinación para llevar a cabo una producción de gran volumen. Las piezas, de forma individual, no suponen grandes pérdidas, aún sin poder ser recicladas de forma eficiente. En este sector, el coste deriva de la parada de las líneas y del tiempo de reinicio, ya que conlleva una inversión en mano de obra que no se aprovecha.

### **7.2.1 Fabricación de carrocería**

La fabricación de carrocerías empieza con el acoplamiento al sistema de una bobina de acero laminado. Grandes motores girando a velocidad constante desenrollan la bobina y alimentan al sistema de forma constante con chapa continua.

El primer paso es el corte. Se aplica presión sobre las líneas de corte gracias a una prensa hidráulica para obtener planchas individuales. Estas planchas pasan a la zona de estampación. Con este proceso se da forma al acero, para ello, un juego de troqueles se coloca en la prensa en función de la pieza que se desea hacer. El troquel es capaz de cortar, perforar y dar forma a una determinada pieza, por lo que es la máquina más importante del taller de prensas, y por eso su mantenimiento y puesta a punto es vital.

Los huecos de tensión pueden variar la velocidad de los motores, pudiendo provocar su parada, o atascando el flujo del bobinado por la maquinaria. Aunque el proceso de reinicio suele durar entre media y pocas horas, en un proceso tan coordinado, lineal y con una interacción máxima entre procesos, la parada en cualquier punto de la línea supone la parada de la línea completa.

### **7.2.2 Línea de ensamble**

Todos los aspectos del ensamble final en la industria automotriz, desde la cadencia hasta la calidad y el número de unidades, requieren una de coordinación precisa y de un suministro constante de piezas.

El proceso de ensamble se lleva a cabo en grandes naves donde un elevado número de brazos mecánicos colocan, taladran y sueldan las piezas obtenidas en producción, tal y como se muestra en la figura 23. Es destacable su alto grado de automatización, lo que redunda en una mayor eficiencia pero también en una mayor vulnerabilidad ante los huecos de tensión.

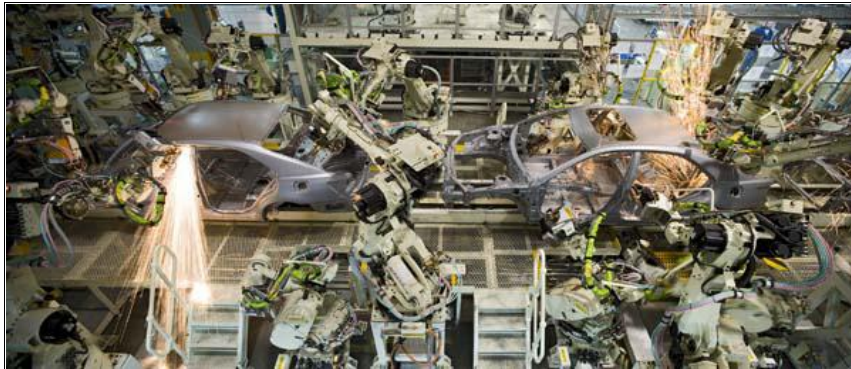


Figura 23. Línea de montaje en factoría Toyota. Fuente: [www.caradvice.com.au](http://www.caradvice.com.au)

Los equipos informáticos y de control, tan sensibles a los huecos de tensión, pueden descoordinar las tareas de montaje, llegando al apagado con el fin de proteger los equipos y las piezas. Los costes se asocian, al igual que en la producción, al tiempo de parada.

### 7.2.3 Fabricación de motores

El volumen de producción de motores y transmisiones en la industria automotriz alcanza las 2500 unidades diarias. Es la parte fundamental del coche y la de fabricación más compleja por la cantidad de piezas que intervienen en el proceso. Debe ser resistente, ligero y eficiente.

Actualmente la industria empieza a fabricar los motores en aluminio, su mayor capacidad para despejar el calor generado, el bajo coste de la materia prima y su buen comportamiento al mecanizado ofrecen ciertas ventajas frente a los motores convencionales.

La etapa más sensible a los huecos de tensión es el moldeo inicial del bloque de cilindros, el armazón del motor donde se montan el resto de piezas. Maquinaria pesada

va eliminando material del bloque de aluminio gracias a un cabezal giratorio controlado de forma electrónica. Un fallo en la electrónica puede dejar inservible la pieza y aunar los costes del material perdido y el tiempo de trabajo.

## **7.3 Industria aeronáutica**

Este sector se caracteriza por el alto coste de la materia prima y la baja posibilidad de reutilización tras una parada en producción. El tiempo y coste de producción en cada pieza es alto, y una parada no controlada, por breve que sea, significa grandes pérdidas.

### **7.3.1 Fabricación en bruto de piezas**

Existen dos tipos de material fundamentales en los aviones modernos, los materiales compuestos y las aleaciones ligeras. Ambos se usan actualmente para la fabricación de todo tipo de piezas.

Los materiales compuestos están constituidos por dos elementos estructurales: fibras y material aglomerante. Este material aglomerante, o "matriz", se aplica en estado viscoso, alternando capas con las capas de fibra sobre un molde de la pieza a fabricar. El proceso de endurecimiento o "curado" se realiza en un autoclave, un horno donde se controla la presión, la temperatura y el tiempo exacto de exposición. Los ciclos pueden durar desde 8 hasta 24 horas, con un coste proporcional de entre 2000 y 6000 euros.

En la figura 24 se aprecia el complejo cableado de un autoclave, su placa de procesamiento recibe gran cantidad de datos de forma continua que permiten una muy alta precisión en los parámetros aplicados. Los huecos de tensión pueden afectar al sistema de control del autoclave, llegando a variar la temperatura o la presión, provocando pequeños defectos como burbujas o ligeros abombamientos en la pieza.



Figura 24. Autoclave factoría Composystem. Fuente: Composystem.

Las aleaciones ligeras, generalmente de aluminio, se trabajan de forma manual por operarios con maquinaria robusta o poco sensible a perturbaciones. El punto más crítico en este estado de fabricación es el proceso de mecanizado en aquellas piezas donde es necesario aplicar altas presiones y obtener ángulos precisos, viéndose expuesto a fallos en el control o en la velocidad del proceso. Puede producir ligeras desviaciones del ángulo requerido o pequeños arañazos en la superficie.

Los exigentes estándares de calidad en piezas aeronáuticas dejan poco margen de error, aquellas piezas con los defectos más ligeros pueden ser reparadas a mano por operarios, incrementando su coste de fabricación o, en el caso más habitual, debiendo ser descartadas. Algo especialmente costoso en el caso de los materiales compuestos, tanto en precio del material como en el costo del funcionamiento del autoclave.

### 7.3.2 Tratamiento de piezas

En los talleres preparan las piezas resultantes en fabricación. En esta etapa de producción se aplican los taladros y se pulen los bordes de la pieza con el fin de poder ajustarla para su ensamblaje. La gran cantidad de orificios requeridos, y la diversidad de profundidades y grosores consumía gran parte del tiempo total de la fabricación procedimiento.

Para mejorar la eficiencia se emplean máquinas de control numérico, terminales que usan programas informáticos para mover cabezales ajustables sobre la pieza y efectuar los

taladros con precisión. Sin embargo, este tipo de equipos es muy sensible a perturbaciones, los huecos de tensión pueden llevar a interpretaciones erróneas en la línea de comandos de la máquina y variar, por ejemplo, ángulos de incidencia o profundidad de taladros.

El coste económico se imputa a las piezas irrecuperables en función del coste del material y del coste de trabajo de fabricación y tratamiento.

### 7.3.3 Montaje

El ensamblaje de piezas y estructuras es un ámbito muy importante en el sector aeronáutico, consumiendo hoy en día muchos recursos. La mayor parte del trabajo se hace de forma manual, disminuyendo la exposición a perturbaciones en la red de potencia que sufren otras industrias.

Pero las grandes piezas como las alas, o el ensamblado de las secciones del avión se realizan con maquinaria pesada accionada con motores. Estos motores, de grandes dimensiones, mueven lentamente las piezas hasta su posición exacta con precisión milimétrica, donde, de nuevo, operarios trabajarán haciendo las uniones con herramientas portátiles. En imagen de la figura 25 se está procediendo al acomplamiento de dos secciones del A-350.



Figura 25. Ensamblado de secciones del A-350. Fuente: Airbus

El alto grado de trabajo manual consigue, en este apartado de la fabricación, que sólo quede expuesto a perturbaciones el momento en el que se acoplan las piezas en los hangares. Estos motores son especialmente sensibles a los huecos de tensión dado que su baja velocidad y alto par acusan las variaciones de tensión. El proceso de arrancado y reequilibrado puede llevar entre una y dos horas. El impacto económico es mínimo si la organización en la planta permite desviar operarios a otras labores.

### **7.3.4 Pintura**

En el proceso de pintado se aplican otras capas de materiales químicos tales como sellantes o aislantes. La aplicación se realiza con pistolas a presión, que requieren de compresores. Si el motor que hace funcionar el compresor pierde velocidad debido a un hueco de tensión, varía la presión obtenida por el compresor y la aplicación de productos es irregular en la superficie. Habitualmente sólo es necesario dar otra capa del producto, en casos extremos es necesario aplicar decapantes y empezar con la pieza desde cero.

Los costes asociados responden al tiempo adicional empleado, ya que el coste de los productos a aplicar de nuevo no es alto. Este proceso, que requiere instalaciones con condiciones ambientales precisas y controladas, puede convertirse en un cuello de botella que retenga la producción.

## **7.4 Ejemplo de costes**

Uno de los estudios de la división norteamericana de "*Copper Development Association*" realizó una encuesta en 2001 que desveló una serie de datos sobre el número de huecos de tensión sufridos y el coste financiero que eso supuso en un grupo de control estadístico de 12 pequeñas empresas relacionadas con la industria metalúrgica. Estos consumidores industriales requerían un suministro de entre 5 y 30 MVA, y operaban con tecnologías de bajo valor añadido, es decir, plantas de producción con procesos sencillos y nivel tecnológico bajo.

Las mediciones se realizaron durante 10 meses. En este intervalo de tiempo se registraron 858 perturbaciones, de las cuales 42 supusieron una incidencia en la producción que conllevase un coste financiero. El coste total de todas las incidencias fue de 600.000 euros, una media de 14.300 euros por evento. El mayor evento, a nivel individual, supuso una pérdida de 165.000 euros [18].

La dificultad de encontrar datos más recientes con este nivel de detalle hace necesario recurrir a un ejemplo de 2001, sin embargo, puede apreciarse el impacto económico que puede resultar para una empresa pequeña o mediana sin las protecciones adecuadas.

## Capítulo 8. Mitigación de los huecos de tensión

Con el fin de minimizar las posibles pérdidas económicas derivadas del efecto de los huecos de tensión en los sistemas eléctricos existen varios métodos de prevención y protección. Se exponen posibles soluciones a todos los niveles, desde la adecuación de la línea de la empresa suministradora hasta los sistemas comerciales que se pueden instalar en las plantas industriales de los consumidores.

### 8.1 Localización de la fuente del hueco de tensión

En el momento de plantear posibles soluciones ante una serie de huecos de tensión se debe estudiar el problema y hacer las mediciones adecuadas para localizar la fuente de las incidencias. Los diferentes sistemas de prevención y protección estudiados conllevan unos costes de instalación y mantenimiento, la localización de la fuente generadora de la perturbación es, por tanto, un aspecto de interés para mejorar la calidad de la instalación a un coste razonable.

Existen dos tipos de estudio, la localización relativa, que simplemente identifica la posición de la fuente generadora de la falla respecto al punto de medición, es decir, se localiza la falla aguas arriba o aguas abajo del punto donde se encuentra instalado el equipo de monitorización, o la localización exacta, que determina el punto de origen de la perturbación.

Aunque la finalidad de estas mediciones no es averiguar la causa de la perturbación, si no simplemente su localización, se deben tener en cuenta el tipo de evento generador de los huecos de tensión para emplear diferentes criterios de cálculo [20].

### 8.2 Soluciones desde la empresa suministradora

La mayor parte de las incidencias surgen en el sistema de distribución de potencia debido a su alta exposición a elementos climatológicos que degradan las instalaciones y a la flora y fauna que, de forma aleatoria, provoca cortocircuitos.



### 8.2.1 Prevención con mantenimiento

La prevención supone actuar antes de que se produzca el hueco de tensión, de tal forma que se reduzcan en número e intensidad.

El mantenimiento es esencial en el sistema de distribución, especialmente en zonas costeras o altamente contaminadas donde se van depositando partículas sólidas sobre aisladores disminuyendo su eficiencia. Requiere de una limpieza más asidua.

En entornos forestales es necesario revisar el crecimiento de árboles, dejando un espacio limpio en torno a las líneas y torres para evitar verse afectado por la caída de ramas. Así como instalar protecciones para mejorar el apantallamiento de las líneas aéreas contra descargas atmosféricas.

### 8.2.2 Bobina Petersen

La Bobina Petersen es una reactancia variable que se conecta entre el neutro del transformador de potencia de una subestación y la malla de puesta a tierra. También se le define como un medio o sistema de puesta a tierra resonante. En la figura 26 se observa el diagrama de conexión.

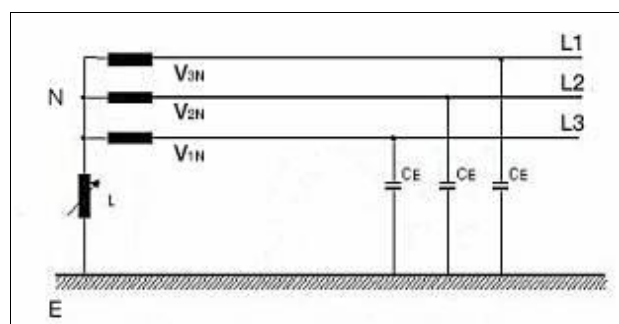


Figura 26. Diagrama de conexión de la Bobina Petersen. Fuente: [21]

Su característica más importante es que durante las fallas a tierra, la corriente inductiva de la reactancia cancela la corriente de falla capacitiva aportada por la red, de forma que

la intensidad que circula por el punto de falla se reduce a una pequeña corriente resistiva. De esta forma su comportamiento es como una limitadora de la corriente de falla a tierra.

Su principal ventaja es ante la ocurrencia de fallas monofásicas en las líneas de distribución de energía eléctrica, que forman la gran mayoría de las redes eléctricas. La bobina Petersen posibilita la explotación de la red durante largo tiempo en estas condiciones de falla, permite reducir drásticamente los disparos transitorios de las protecciones, evitando hasta un 70% del número de incidencias y, por tanto, reduciendo el número de huecos de tensión.

### **8.2.3 Seccionamiento del sistema**

Los huecos de tensión se propagan por la red eléctrica, por tanto un alto seccionamiento del sistema permite aislar las perturbaciones de forma más efectiva. Un mayor número de protecciones en la línea facilita el poder despejar la falta antes de llegar a las instalaciones consumidoras.

Adquiere más importancia en el caso de los huecos de tensión debido a que el arranque de grandes motores en las instalaciones de un consumidor puede afectar a otros consumidores, especialmente si la impedancia del sistema es baja.

### **8.2.4 Desarrollo de la red**

En el Real Decreto 1634/2006 se contempla la obligación de destinar una mayor inversión en aquellas zonas donde la calidad de onda y continuidad de suministro no llega a los mínimos establecidos por el propio Real Decreto. El fin es conseguir un sistema más robusto mediante el desarrollo de la red.

Se toman varias medidas al respecto:

La puesta en marcha de nuevas instalaciones eléctricas que duplique las vías de suministro para servir de apoyo en caso de cortocircuitos en líneas.

El soterramiento de líneas aéreas, quedando menos expuestas a climatologías adversas o incidentes con flora y fauna.

## **8.3 Soluciones por parte del consumidor**

Una de las líneas de actuación para mitigar los huecos de tensión es la actuación sobre la propia instalación de la planta industrial, aplicar una serie de mejoras en el diseño y la implantación de sistemas que protegen los procesos de control y producción frente a posibles perturbaciones.

Los procesos de control, generalmente coordinados desde equipos informáticos, son los más vulnerables ante los huecos de tensión. Como se ha visto en el capítulo 7, este tipo de fallos son los causantes de gran parte de los costes asociados a estas perturbaciones, ya que pueden llegar a parar una planta incluso cuando la maquinaria de producción ha seguido funcionando debido a su inmunidad a huecos de tensión cortos y poco profundos.

Por otro lado, la potencia necesaria para asegurar estos procesos es relativamente pequeña comparada con la necesaria en los procesos de producción, dado que existe una relación directa entre el nivel de potencia de la instalación a proteger y el coste de implementar dicha protección.

Interesa, por tanto, dotar al circuito de control de la inmunidad necesaria para evitar su apagado o, en caso de no ser posible, de mantenerlo activo el tiempo suficiente para proceder a una parada ordenada de la planta [21].

### **8.3.1 Sensibilidad de los contactores**

Uno de los sistemas más efectivos y económicos a la hora de mantener funcionando la producción es ajustar adecuadamente la sensibilidad del contactor [13].

Un contactor es un dispositivo con capacidad de cortar la corriente eléctrica de un receptor o instalación. Es del tipo “todo o nada”, es decir, o está en reposo, sin actuar,

dejando circular corriente hacia el motor, o se activa cuando la señal recibida sale de su rango, cortando la circulación de corriente y apagando el motor para salvaguardarlo de posibles averías.

Cada fabricante determina una curva de operación que establece si el motor permanece en funcionamiento o debe apagarse. La figura 27 muestra el rango de actuación de los contactores, representando una amplia gama de dispositivos comerciales y su efecto en los motores.

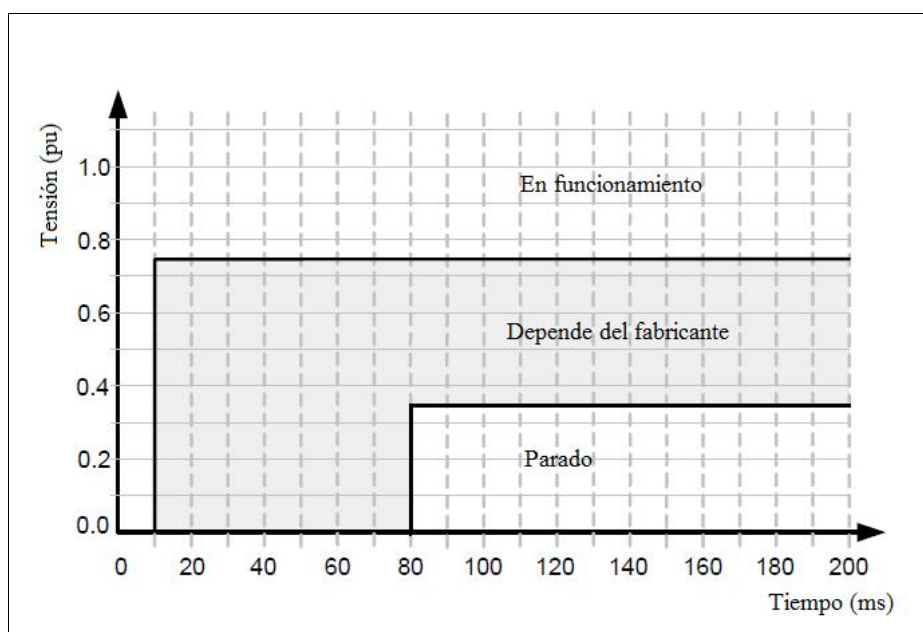


Figura 27. Rangos de funcionamiento de contactores en motores. Fuente: [21]

El límite superior viene dado por el sensor más sensible, con una curva muy estricta. Hasta los huecos de tensión menos profundos pueden provocar la parada del motor. Disminuir la sensibilidad del contactor para que no se active con los huecos que el motor puede soportar reduce el número de paradas y, por tanto, el coste asociado a estas paradas.

### 8.3.2 UPS, sistema de baterías

Uno de los sistemas de protección más usados son los sistemas UPS, un conjunto de convertidores y baterías instalados a la entrada del circuito. Esta configuración permite la alimentación de corriente alterna desde la red y su transformación en corriente continua

para su almacenamiento en baterías. Existen dos tipos de sistema UPS, los sistemas "offline" y los sistemas "online", cuya diferencia radica en el lugar de conexión de las baterías.

Debido al alto coste de las baterías y a la capacidad limitada de energía en relación con el consumo de una planta industrial, estos sistemas sólo pueden suministrar energía durante unos segundos. Es especialmente adecuado frente a huecos de tensión de poca duración o simplemente para ofrecer tiempo que permita apagar ordenadamente los procesos [3].

### 8.3.2.1 UPS "offline"

La línea de suministro y el sistema UPS se conectan en paralelo, como se muestra en la figura 28. Durante el funcionamiento normal de la línea el interruptor estará normalmente cerrado, alimentando a la carga de forma directa desde la red. Las baterías estarán cargadas, o en proceso de carga, sin emitir energía.

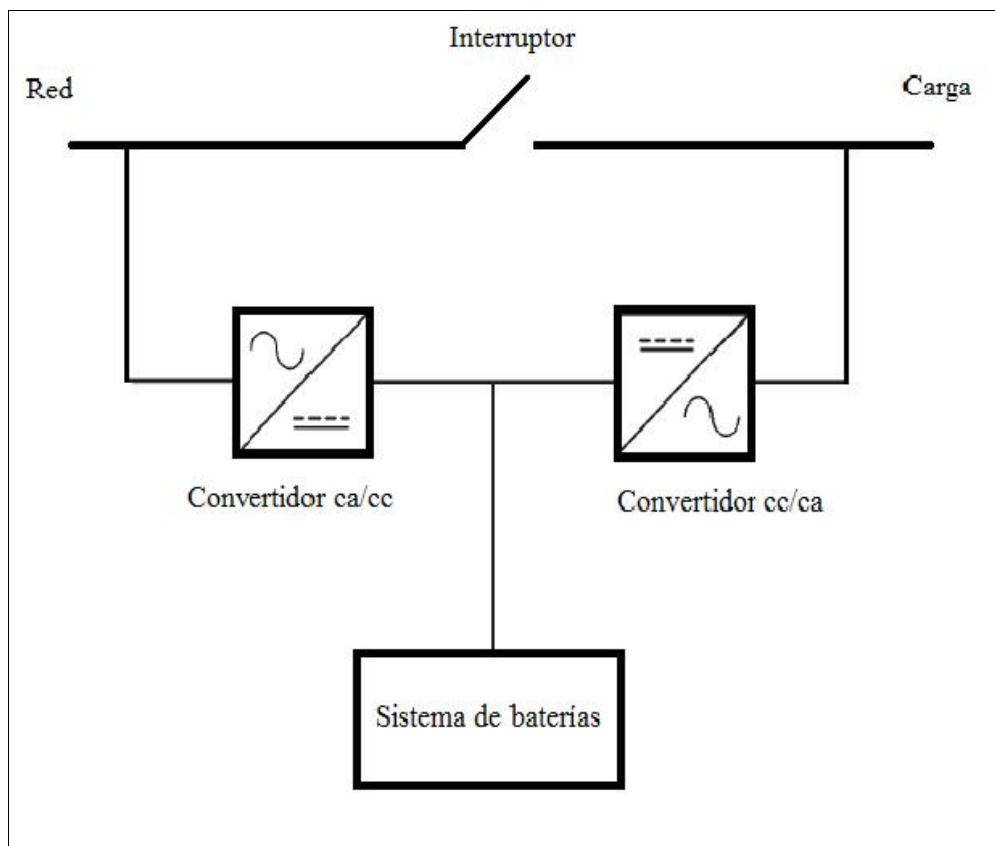


Figura 28. Diagrama de un sistema UPS "offline"

En caso de perturbación el interruptor de conmutación actúa abriéndose, y la carga pasa a ser alimentada desde el sistema de baterías.

Este sistema presenta una alta durabilidad de sus componentes, debido a que las baterías no están funcionando constantemente y sólo se activan cuando hay perturbaciones. En cambio, al abrirse el interruptor para cambiar la alimentación, se genera un pequeño hueco de tensión mientras dura el tiempo de conmutación.

### 8.3.2.2 UPS "online"

En este caso el sistema de convertidores está instalado en serie con la red y la carga. La red alimenta la carga después de una doble conversión y alimenta las baterías a través del rectificador.

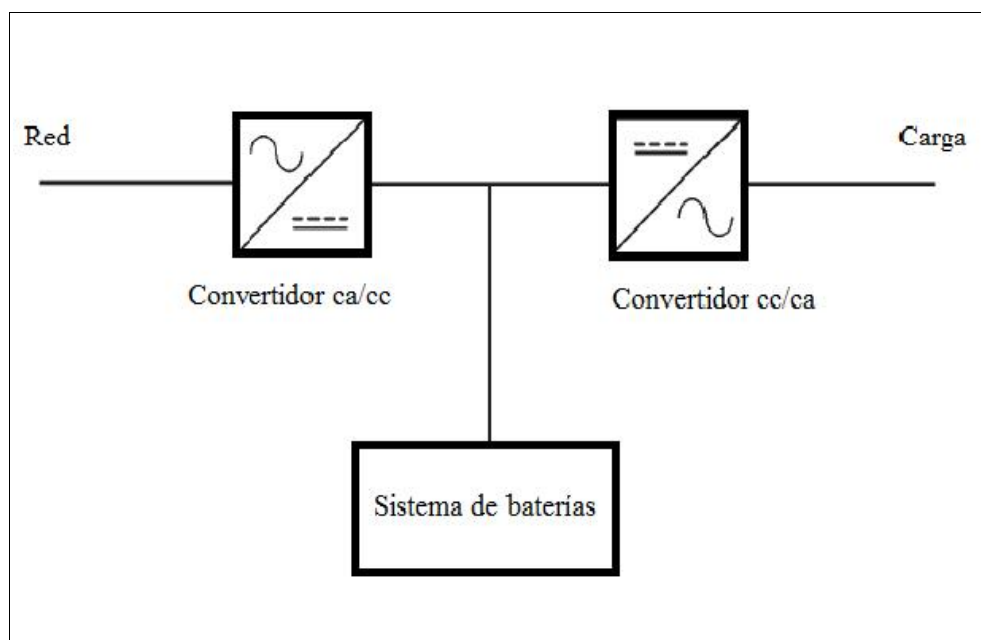


Figura 29. Diagrama de un sistema UPS "online"

Este sistema no presenta ningún defecto de tiempo de conmutación, pues está constantemente alimentando desde las baterías, lo que lo convierte en un sistema más seguro y estable.

Sin embargo, es menos eficiente por la necesidad de la doble conversión y los componentes sufren mayor envejecimiento por su uso constante, lo que conlleva un mayor coste de mantenimiento.

### 8.3.3 Volantes de inercia

Este sistema combina un motor y un generador instalados en el mismo eje. La red alimenta al motor que hará girar el eje que, a su vez, conecta un generador que produce energía eléctrica. Transforma energía eléctrica en mecánica y esta, de nuevo, en eléctrica. Este proceso permite insertar un disco en el eje a través de un orificio alejado de su centro para acumular energía mecánica.

El disco gira a la velocidad constante que proporciona el rotor del motor adquiriendo una inercia que, en caso de perturbación, mantendrá en giro el eje durante varios segundos (en función del peso y tamaño del disco). Suficiente para soportar el tipo de hueco de tensión más común, los de corta duración [6].

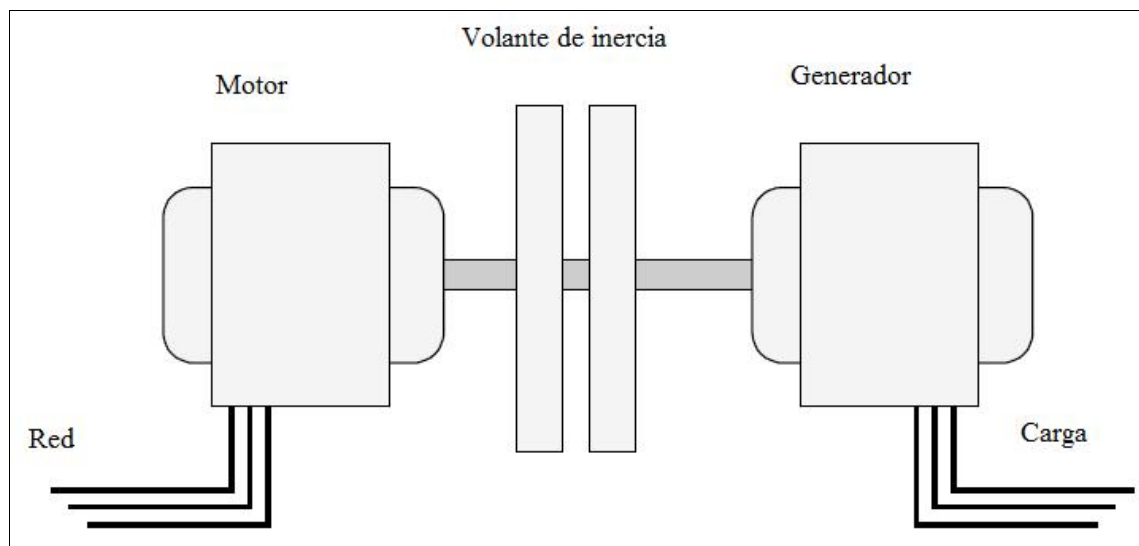


Figura 30. Esquema de un volante de inercia. Fuente: [3]

A mayor volumen del disco, mayor densidad de energía podrá contener, y mejor será su actuación frente a huecos más largos, pero mayor será el tiempo necesario para conseguir estar operativo. Su consumo adicional de energía y el ruido que provoca lo hace solamente adecuado en aquellos procesos que requieren de un funcionamiento constante

sin posibilidad de parada.

### 8.3.4 Restaurador dinámico de tensión

El restaurador dinámico de tensión (Dynamic Voltage Restorer, DVR) consiste en un inversor de fuente de tensión, transformadores de inyección, filtros pasivos y un dispositivo de almacenamiento de energía. En la siguiente figura se observa su configuración.

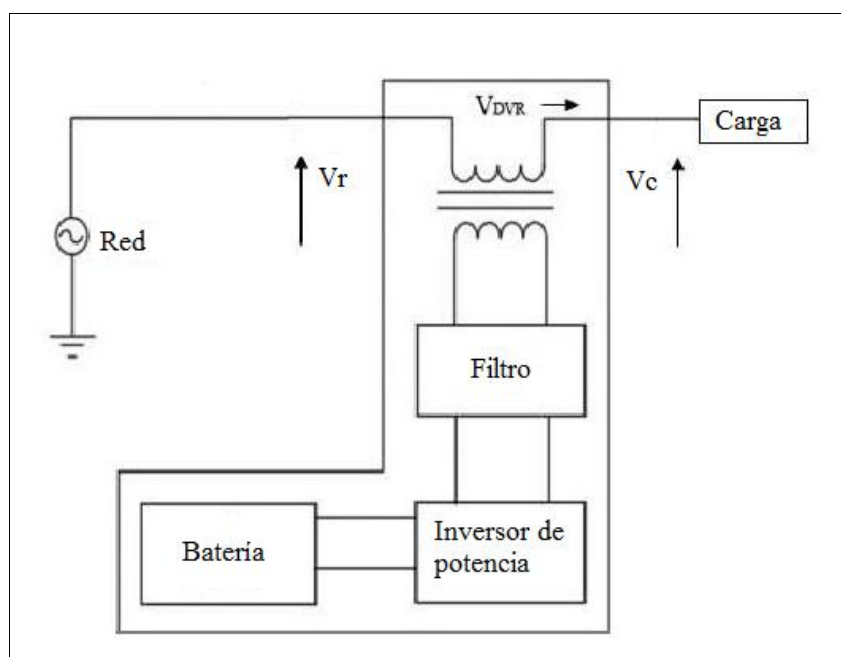


Figura 31. Esquema de instalación DVR. Fuente: <http://www.powerqualityworld.com>

El DVR compara la tensión de entrada,  $V_r$ , con los valores predeterminados para la carga. En caso de perturbación, y caída de tensión de la red, inyecta la tensión necesaria para compensar y conseguir que la tensión en la carga,  $V_c$ , se mantenga constante [21].

La amplitud y el ángulo de fase es variable, permitiendo un control completo de la potencia activa y reactiva que se intercambia con el sistema de distribución. La energía que alimenta el DVR puede ser una fuente de generación externa, o una batería.

En la figura 32 se muestra el funcionamiento del DVR expresado con las formas de onda de la tensión. Cuando la onda de tensión de la línea (onda azul) sufre un hueco de



tensión, el DVR genera una onda de tensión (onda roja) con valores variables en función de la profundidad y duración del hueco de tensión, para conseguir que la suma de ambas resulte en una onda de tensión (onda verde) que no provoque fallos en nuestros equipos.

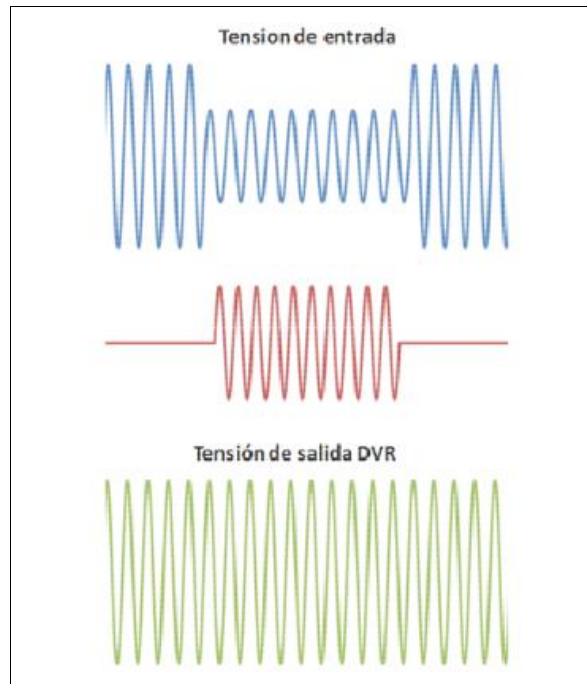


Figura 32. Ondas de tensión de entrada y salida del DVR. Fuente: Iberdrola.

Este sistema se vuelve vulnerable conectado a redes con un nivel alto de potencia reactiva dado que los niveles de tensión que necesita para actuar caen, provocando una serie de fallos en cascada [22].

### 8.3.5 Variadores de frecuencia

Uno de los efectos de los huecos de tensión es la disminución de velocidad del motor, afectando a los procesos que requieren que este parámetro sea muy estable.

Un variador de frecuencia es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. Inyectan tensión con valores de frecuencia dinámicos, que permiten obtener control sobre la velocidad, corrigiendo los defectos producidos y manteniendo la estabilidad cuando sufra una perturbación [21].

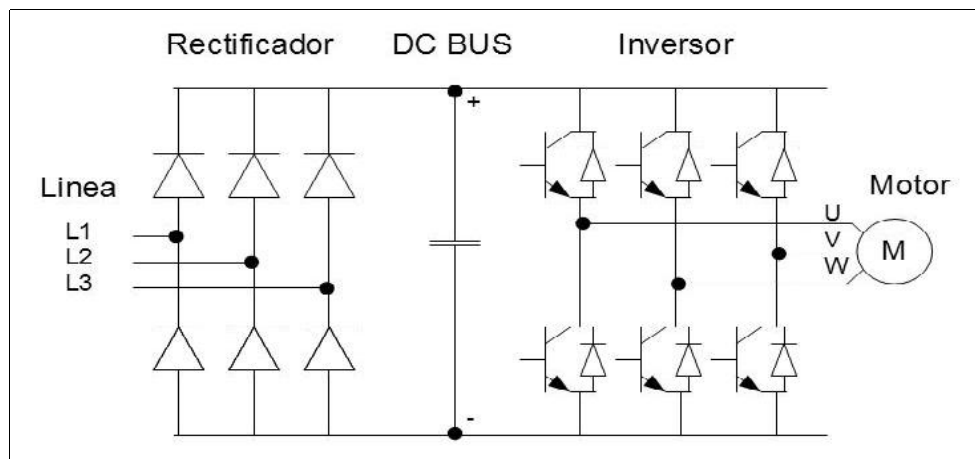


Figura 33. Esquema de un variador de frecuencia. Fuente: [www.infoplc.net](http://www.infoplc.net)

La estructura de un variador de frecuencia se muestra en la figura 33, se modifica la señal de entrada mediante el disparo controlado de los elementos del inversor. Este sistema, controlado por electrónica, es a su vez sensible a huecos de tensión. Para evitar que las perturbaciones afecten a su propio funcionamiento, es habitual separar su alimentación del circuito de potencia general. Una instalación paralela, más pequeña y económica de proteger, puede lograr inmunizar y asegurar su funcionamiento.



Figura 34. Imagen de variador de frecuencia. Fuente: [www.siemens.com](http://www.siemens.com)

### 8.3.6 Resumen de aplicaciones.

En el siguiente cuadro resumen, tabla 4, se indica brevemente en qué circuitos es recomendable la instalación de estos sistemas de protección y mitigación.

Sistema	Campos de aplicación
Modificación de la sensibilidad de los contactores	El rango de actuación de los contactores define las zonas de funcionamiento de un motor. Por ello, su campo de actuación es el circuito de potencia, independientemente de las dimensiones de dicho circuito.
Sistema de baterías UPS offline	El sistema de baterías offline sufre un pequeño hueco de tensión al cambiar la fuente de alimentación de la carga, por tanto no es recomendable para proteger el circuito de control. Así mismo, el alto coste de su instalación sólo lo hace adecuado para pequeños circuitos de potencia.
Sistema de baterías UPS online	Este sistema es robusto y estable, aunque es uno de los más costosos, su uso es recomendable para los circuitos de control y equipos informáticos.
Volante de inercia	Su alto nivel de contaminación acústica y el tamaño requerido para su instalación lo hace sólo adecuado para circuitos de potencia de cualquier tamaño en plantas que requieran un funcionamiento constante de altas prestaciones sin importar los inconvenientes.
Restaurador Dinámico de Tensión, DVR	Es un sistema polivalente de gran capacidad de reacción que puede instalarse en el circuito de control o en el circuito de potencia.
Variador de frecuencia	Se usa en motores trifásicos, por tanto su campo de aplicación es el circuito de potencia. Es necesario proteger su cuadro de control.

Tabla 4. Cuadro resumen de los sistemas de mitigación

## 8.4 Cuantificación económica de las soluciones.

El procedimiento de evaluación económica para mejorar el comportamiento de cada instalación ante los huecos de tensión depende de 3 variables:

- 1) Estudio del coste económico derivado de la variación de calidad de onda. Es decir, cómo las perturbaciones afectan a los procesos industriales y qué pérdidas supone.
- 2) Caracterizar la solución en función del tipo de incidencia. Elegir aquellas

soluciones que se adapten técnicamente a los problemas específicos que sufre cada instalación, y estudiar su coste de adaptación y mantenimiento.

- 3) Realizar un estudio de viabilidad sobre cual de las opciones supone una mejor rentabilidad a largo plazo. Incluyendo la opción de aceptar los huecos de tensión si estos provocan pérdidas menores al coste de que supondría la instalación y mantenimiento de la protección.

En la tabla 5 se muestran algunos ejemplos de tecnologías de mitigación con su coste aproximado de instalación y mantenimiento en función de la potencia de la instalación. Los datos cotejables más recientes, presentados en esta tabla, corresponden a documentación de 2004.

Tecnología	Inversión inicial	Porcentaje de mantenimiento respecto al coste de instalación inicial
Protecciones del circuito de control (<5 kVA)		
Sistema de baterías	400 €/ kVA	25%
Restaurador dinámico de tensión	200 €/ kVA	5%
Protección de maquinaria (10 – 300 kVA)		
Sistema de baterías	400 €/ kVA	15%
Volante de inercia	400 €/ kVA	7%
Restaurador dinámico de tensión	180 €/ kVA	5%
Protección de planta (2 – 100 MVA)		
Sistema de baterías	400 €/ kVA	15%
Volante de inercia	400 €/ kVA	5%
Restaurador dinámico de tensión	250 €/ kVA	5%

Tabla 5. Costes medios de instalación y mantenimiento de sistemas de mitigación. Fuente [3]

## Capítulo 9. Protocolo de estudio

En el presente documento se ha expuesto la teoría sobre los huecos de tensión y su impacto en la industria, así como las medidas de mitigación más extendidas. Debido a la dificultad de extrapolar los resultados de los estudios entre diferentes plantas de producción es necesario diseñar un protocolo que establezca unas pautas para la elección de una protección adecuada.

### 9.1 Estudio de procesos vulnerables

Es necesario revisar el proceso seguido durante la producción. Conociendo qué tipo de maquinaria actúa, y la forma en qué lo hace, se puede establecer cuales son los puntos más vulnerables para poder elegir la mitigación que más se ajuste a las necesidades de la planta.

Cada factoría elabora sus propios planes de fabricación en función de las instalaciones disponibles, de los horarios de los operarios y de la economización de sus recursos. En ciertas factorías, dentro de los planes de flexibilización de la producción, se puede llegar a delegar parte de la organización a pequeños equipos de operarios en la zona de trabajo.

Por tanto, es recomendable que el estudio de los procesos vulnerables se haga en el propia planta con ayuda de los operarios, para conocer la maquinaria y su uso. El método más completo para obtener la información de cada proceso es realizar una serie de entrevistas estandarizadas que permitan cotejar y, en cierta medida homologar, las respuestas de todo el personal.

En el capítulo 7 se exponen tres ejemplos de industrias con sus procesos más importantes y los potenciales fallos asociados a un hueco de tensión. Para ello se han realizado una serie de preguntas detalladas en la tabla 6, efectuadas en los propios talleres a los operarios o encargados de las diferentes plantas. En paralelo se ha llevado a cabo un estudio de la documentación técnica disponible de los diferentes equipos para conocer datos como los valores de potencia requeridos o la sensibilidad a perturbaciones eléctricas.

Núm. de pregunta	Pregunta
1	¿Cuál es su puesto en la empresa o planta industrial?
2	¿Qué maquinaria interviene en el proceso completo?
3	¿Cuál es su labor principal en el proceso?
4	Detalle el equipo (o equipos) donde desarrolla su labor
5	¿En qué momento de su funcionamiento existe mayor número de incidencias?
6	¿Cuál es el efecto de estas incidencias sobre la maquinaria?
7	¿Cuál es el impacto sobre el proceso de fabricación?

Tabla 6. Índice de preguntas propuestas para identificar vulnerabilidades

La primera pregunta será necesaria a la hora de asignar el grado de conocimiento técnico esperado en el encuestado. La segunda pregunta pretende establecer una visión general sobre el proceso desde su inicio hasta su fin. Las siguientes cuestiones se centran en la experiencia específica de cada operario.

Es necesario señalar que la quinta pregunta englobará todo tipo de incidencias, no sólo las referentes a los huecos de tensión, lo que conlleva la necesidad de analizar si se trata de un fallo de origen mecánico o de origen eléctrico, y en caso de ser un fallo eléctrico, a qué perturbación corresponde.

## 9.2 Aparición de huecos de tensión

Se ha incidido en que la aparición de huecos de tensión tiene un origen aleatorio por su imprevisibilidad, pero existe un cierto grado de causalidad debido a factores tales como la frecuencia de tormentas o el estado de la aparamenta eléctrica de la zona, causas posibles de huecos de tensión.

Los datos estadísticos pueden reflejar esa causalidad y contribuir a establecer una base sobre la que iniciar el estudio. El rango temporal sobre los que se toman estos datos debe

ser de al menos un año para poder considerar el factor estacional, aunque es recomendable, de ser posible, estudiar las apariciones durante varios años para obtener resultados más ajustados a la realidad.

Obtener datos actualizados sobre huecos de tensión es una de las dificultades más reseñables para realizar un buen estudio. Es recomendable informarse en la compañía suministradora aunque no tenga obligación legal de medir cada perturbación por separado. Otra posibilidad radica en entablar contacto con alguna de las asociaciones del ramo industrial al que pertenezca la empresa por si hubiera empresas similares a quien consultar en el entorno. Por último, existen varios estudios realizados por *European Copper Institute* [18] que, aunque desfasados actualmente, ofrecen información sobre la aparición y los costes de los huecos de tensión en varios países europeos para usar como referencia.

De disponer de varias fuentes de las que obtener los datos, es recomendable escoger los que más próximos se encuentren a la planta estudiada, siendo la mejor opción las mediciones propias. En el punto 5.4 de este documento se indica el equipo necesario y las normas de uso requeridas.

### 9.3 Estudio de inversión

Se asume que se ha realizado un estudio previo del coste de producción de cada pieza valorando el coste de la materia prima, el coste de funcionamiento de la maquinaria, el coste de los operarios y otros factores indirectos. Es necesario un alto grado de conocimiento del proceso completo, tanto en funcionamiento como en costes asociados en cada paso.

Una primera protección para evitar huecos de tensión, y otras perturbaciones relacionadas con la tensión, es asegurar que nuestras instalaciones cumplen los mínimos establecidos con el diseño propuesto en la curva ITIC-CBEMA presentada en el capítulo 6. Comparar los datos detallados obtenidos de los huecos de tensión con dicha curva descarta todas aquellas perturbaciones que los equipos van a poder resistir sin peligro de fallo o apagado.

Una vez conocidos los huecos de tensión que pueden, potencialmente, afectar a la planta industrial, se debe revisar la información obtenida de los operarios para decidir qué procesos son más sensibles y cuales de ellos derivan en mayores pérdidas por fallo e incurren, por tanto, en un mayor impacto económico.

Existen varias pautas explicadas en el capítulo 6 que indican, de forma general, qué circuitos son más sensibles, cuales son más caros de proteger debido a su mayor potencia y qué elementos implican un mayor número de procesos simultáneos.

En el capítulo 8 se mencionan las principales tecnologías de mitigación con sus costes de mantenimiento como referencia. Para calcular el coste total de la inversión es necesario dimensionar, en términos de potencia, la instalación a proteger.

Es posible que en algunos casos el coste de la inversión a realizar sea mayor que el coste por pérdidas, o que sea rentable sólo proteger determinados circuitos, procesos o elementos cuyo coste por error sea muy alto y asumir el fallo en el resto de instalaciones.

Se debe tener en cuenta que el coste total que se asume por los huecos de tensión corresponde a la suma de la inversión realizada para su mitigación más las pérdidas en las que se incurren por aquellos no mitigados. Un buen estudio de inversión debe tener en cuenta todos los escenarios posibles, estudiar cada uno de ellos y comparar los resultados para tomar una decisión basada en criterios técnicos y económicos.



## Capítulo 10. Estudio de un caso ejemplo

En este capítulo se realiza un estudio ejemplo sobre protección frente a huecos de tensión partiendo de una licitación de un contrato en el sector aeronáutico. Conociendo los costes de producción, y recurriendo a datos estadísticos, se procede a valorar las diferentes opciones existentes a la hora de tomar una decisión sobre qué inversiones realizar para protegerse frente a huecos de tensión.

### 10.1 Presentación del caso

Una importante compañía aeronáutica, embarcada en el diseño de un nuevo avión comercial, ha encontrado un fallo de diseño ya en la fase de montaje.

Al ensamblar la sección inmediatamente posterior a la sección del carenado, la pieza situada en la parte inferior central de la aeronave y que permite la unión de las alas al fuselaje, se generan tensiones de rotura por encima de la norma tanto en los largueros que forman la estructura principal del avión como en la parte inferior externa del ala. Reforzar los largueros, primera solución a pie de taller, traslada toda la tensión de rotura hasta las alas, corriendo el riesgo de provocar grietas en estas.

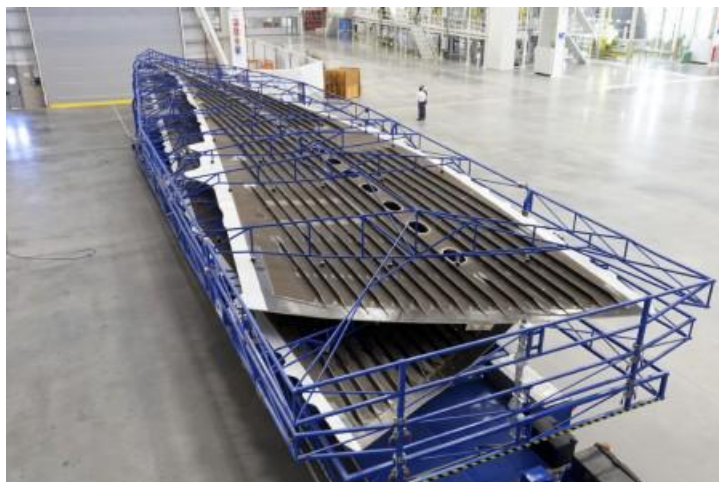


Figura 35. Parte inferior externa del ala. Fuente: Airbus

La fabricación de estas piezas, las más voluminosas con una longitud de 32 metros de

largo y hasta 6 de ancho, fotografiadas en la figura 35, ya se realiza en serie. Ante la necesidad de cumplir plazos y los grandes costes asociados a cambiar el diseño original de piezas tan grandes una vez está en producción, se opta por diseñar una nueva pieza que absorba parte de esa tensión estructural para incorporarla en el montaje.

El departamento de diseño estructural encuentra una solución de fácil producción, una pieza curvada de material compuesto con una longitud de 3 metros que se acoplará junto a la costilla del ala. Debe ser en su totalidad de fibra de carbono para no añadir demasiado peso al conjunto, por lo que esta pieza requiere de curado en un autoclave, instalación que pocas plantas disponen.

Las empresas subcontratadas habituales no pueden hacerse cargo ya que sus instalaciones están funcionando a pleno rendimiento y la inversión de ampliar factorías no es rentable para un pedido puntual. Por tanto, se saca a concurso urgente un contrato para suministrar 1800 piezas en los siguientes 2 años.

## **10.2 Sensibilidad a huecos de tensión**

El proceso de fabricación se inicia con el corte de forma manual de un rollo de fibra de carbono según la forma indicada en el diseño. Estas telas, ya cortadas, de 0.17 milímetros de grosor se introducen en una máquina que aplica de forma alterna una capa de fibra de carbono y una capa uniforme de resina, hasta colocar las 180 capas necesarias para alcanzar el grosor requerido.

Una vez se han colocado todas las capas, se aplica un primer tratamiento de vacío para expulsar las posibles burbujas. Al acabar este proceso previo, el producto resultante se introduce en el autoclave durante un ciclo de 8 horas, las dimensiones de la pieza y del autoclave permiten el curado de 2 piezas a la vez.

A la salida del autoclave, un operario revisa la pieza, limando los bordes sobrantes y descartando las piezas que presenten defectos. Una burbuja en la superficie es motivo suficiente para desechar la pieza, siendo imposible su reciclaje.

Los procesos vulnerables a huecos de tensión son la colocación de las capas, que

funciona con un pequeño motor de 30 kVA, y el autoclave, que requiere de varios motores con una potencia total de 150 kVA. Ambas maquinarias disponen de un sistema de control independiente que puede ser instalado en otro punto eléctrico con un consumo individual de 0,5 kVA.

### 10.3 Análisis económico de costes

Es necesario realizar ciertos cálculos para conocer el coste unitario de producir cada pieza. La longitud de la pieza es de 3 metros por 0,2 de metros de anchura y un grosor de 3 centímetros. La fibra de carbono requerida, con un grosor de 0,17 milímetros, se presenta en rollos de 1 metro de ancho y 100 metros de largo, y su coste asciende a 40€/m<sup>2</sup>.

El conformado de las piezas requiere de 180 capas, y el diseño suministrado por la compañía contratante aprovecha un 85% de superficie del material. El coste en concepto de material para cada pieza se calcula así:

$$\text{m}^2 \text{ necesarios} = \frac{(\text{longitud} \times \text{ancho} \times \text{n}^{\circ} \text{ de capas})}{\text{superficie aprovechada}}$$

$$\text{Precio} = \text{m}^2 \text{ necesarios} \times \text{coste}$$

$$\frac{(3 \times 0,2 \times 180)}{0,85} = 127 \text{ m}^2 \text{ necesarios}$$

$$\text{Precio} = 127 \times 40 = 5082 \text{ €}$$

A este precio, que incluye únicamente el coste de la fibra de carbono, se le debe sumar el coste del ciclo en el autoclave, que consume gran cantidad de energía, y el coste del trabajo de los operarios sobre la pieza.

Un ciclo normal de autoclave requiere entre 8 y 10 horas, con un coste aproximado de 2000 euros. Teniendo en cuenta que en cada ciclo podemos curar 2 piezas, el coste añadido asciende a 1000 euros por pieza.

Se calcula que son necesarias 40 horas totales de trabajo manual por pieza. En el coste por hora de trabajo se incluyen costes directos y costes indirectos atribuidos a la pieza, asumiendo un precio medio para empresas subcontratadas en el sector aeronáutico de 45 euros por hora, el coste por cada pieza asciende a 1800 euros.

La suma de estos tres valores muestra que el valor de cada pieza es de 7882 euros.

## 10.4 Aparición de huecos de tensión

La dificultad para recabar información actualizada de datos contrastables sobre estadísticas de aparición de huecos de tensión puede solventarse recurriendo a una tabla de apariciones propuesta en la norma UNE-EN 50160 [5]. En la propia norma se reseña *“debe anotarse que esta tabla sólo puede utilizarse como ejemplo ilustrativo, los valores mostrados no pretenden ser interpretados como valores típicos”*.

Tensión residual	Duración del hueco de tensión				
	0,01 s – 0,02 s	0,2 s – 0,5 s	0,5 s – 1 s	1 s – 5 s	5 s - 60 s
80% - 90%	26,6	2,8	1,6	0,4	0,2
70% - 80%	9,8	0,7	2,0	0	0
40% - 70%	9,5	0,5	0,2	0	0
5% - 40%	1,3	0	0	0	0
<5%	0,2	0	0	0	0

Tabla 7. Ejemplo de distribución de apariciones de hueco de tensión. Fuente: [5]

Los datos de la tabla son resultado de mediciones específicas sobre una estación de transformación en el periodo de 6 años. Los valores mostrados corresponden a la aparición media por año de un hueco de tensión de determinada profundidad y duración. Por ejemplo, cada año se esperan 2 huecos de tensión con una tensión residual de entre 70% y 80% y con una duración de 0,5 a 1 segundos.

Un estudio más concreto debe tener en cuenta las estadísticas específicas de cada zona, siendo necesarias mediciones particulares. Para el caso expuesto, se toman estos valores ejemplo.

Actualmente gran parte de la maquinaria y los equipos cumplen la curva ITIC-CBEMA. Esto significa que se pueden descartar aquellas perturbaciones que se produzcan dentro de la zona de funcionamiento normal de dicha curva. Los huecos de tensión inferiores a 0,02 segundos (o 20 ms) y los que tienen una tensión residual por encima de 80% y duración menor que 10 segundos no producirán ningún efecto sobre nuestros equipos.

El número de huecos de tensión potencialmente perjudiciales para los equipos se reduce considerablemente. Teniendo en cuenta que el contrato ofertado es para dos años, y asumiendo un escenario desfavorable en el que si un hueco de tensión puede suceder o no, sucederá, se obtiene que en el caso ejemplo se producen cuatro huecos de tensión con una tensión residual entre 70% y 80%, dos entre 40% y 70% y uno entre 80% y 90%, cuya principal característica para ser considerado severo es su larga duración mantenida en el tiempo.

## 10.5 Análisis de inversiones

Existen tres opciones de inversión posible. Se puede optar por proteger toda la planta, proteger sólo la instalación de control y no proteger nada, asumiendo las pérdidas. Antes de estudiar cada opción por separado se deben establecer ciertas pautas mencionadas a lo largo del proyecto.

- La maquinaria, debido a su funcionamiento con motores, tiene cierto grado de inmunidad a los huecos con menor profundidad y duración que lo reflejado en la curva ITIC-CBEMA. Por tanto, sólo se considera que su funcionamiento sufre anomalías en los huecos de tensión con una tensión residual menor al 70%.
- Las instalaciones de control y de potencia están debidamente separadas. Existe un circuito específico para equipos informáticos y terminales de control de maquinaria. La potencia total requerida asciende a 3 kVA.
- El fallo en los terminales de control produce errores en la producción, incluso cuando la propia maquinaria ha sido inmune al hueco de tensión.

### 10.5.1 No acometer inversiones

Si se decide no invertir en sistemas de mitigación, y dado que el autoclave funciona a doble turno, la planta sufrirá 7 huecos de tensión durante el periodo de contratación que derivarán en pérdidas. Cada ciclo de autoclave cura 2 piezas, y esto se traduce en que 14 piezas, con un coste unitario de 7882 euros, quedarán inservibles.

Las pérdidas totales a asumir son 110.348 euros.

### 10.5.2 Proteger instalación de control

La instalación de control consta de los dos terminales de control de la maquinaria y de tres ordenadores destinados a la programación de turnos e impresión de planos. La potencia de la instalación a proteger son 3kVA, e inmunizará a los sistemas de control frente a huecos de tensión. De esta forma, sólo las perturbaciones capaces de afectar a las máquinas pueden provocar pérdidas.

Existen dos opciones para inmunizar el sistema de control, se puede instalar un sistema de baterías (UPS) o un restaurador dinámico de tensión (DVR).

El sistema de baterías tiene un coste inicial de 400 euros por kVA de instalación y un mantenimiento anual del 25% sobre el coste de instalación. El precio final asciende a 1800 euros por inmunizar el sistema de control.

El restaurador dinámico de tensión ofrece un coste más bajo, 200 euros por kVA y un sobre coste anual del 5%. El precio final asciende a 660 euros.

Aunque el precio final del restaurador dinámico de tensión es más bajo se opta por instalar un sistema de baterías, que ofrecen, además de un sistema más seguro, protección frente a interrupciones cortas. Esta decisión se basa en evitar la pérdida de información de los equipos informáticos, prevaleciendo los criterios técnicos frente los económicos.

Finalmente, el coste de no proteger la maquinaria, afectada por los 3 huecos de tensión

con tensión residual inferior al 70%, y el consiguiente descarte de 6 piezas, asciende a 47.292 euros.

El coste total es la suma de la inversión realizada y las pérdidas asumidas. En este caso ascienden a un total de 49.092 euros.

### **10.5.3 Proteger toda la planta**

Los tres tipos de sistemas diferenciados para conseguir la inmunidad de toda la planta son el volante de inercia, un sistema de baterías (UPS) y el restaurador dinámico de tensión (DVR).

Dada la actividad para la que se busca inmunidad se descarta el volante de inercia, este es especialmente ruidoso, sólo ponderable para industria con un nivel de contaminación acústica alta de por sí que no obliguen a tomar medidas extraordinarias, cómo instalaciones de paneles insonorizantes.

El sistema de batería UPS tiene un coste de 400 euros por kVA de instalación, y un 15% de ese coste de forma anual en concepto de mantenimiento. Se quiere proteger toda la planta, lo que incluye 150 kVA del autoclave, 30 kVA de la maquina de conformado y 3 kVA del sistema de control.

El coste de instalar un sistema de baterías asciende a 72.000 euros y el mantenimiento para dos años hasta 21.600 euros. Una inversión total de 93.600 euros.

El restaurador dinámico de tensión tiene un coste muy inferior, en torno a 180 por kVA de instalación, con un coste de mantenimiento del 5% anual respecto a la instalación inicial.

El coste de instalar un restaurador dinámico de tensión comercial asciende a 32.940 euros y su mantenimiento para los dos años asciende a 3394 euros. Una inversión total de 36.334 euros.

Dada la diferencia de costes, esta vez sí se opta por el sistema de protección más

económico, el restaurador dinámico de tensión.

En este caso, al no haber pérdidas por descarte de piezas, el coste total a asumir es el precio del sistema instalado. El coste total asciende a 36.334 euros.

## 10.6 Conclusiones

En la tabla 8 se resume el análisis de los apartados anteriores. Se establece que el coste total de cada opción es la suma de la inversión realizada para adecuar las instalaciones y las pérdidas por cada pieza desechada, material y mano de obra.

Opciones contempladas	Nº de huecos de tensión sufridos	Pérdidas por huecos de tensión (Euros)	Inversión en protección (Euros)	TOTAL (Euros)
Sin protección	7	110.348	0	110.348
Protección control	3	47.292	1.800	49.092
Protección planta	0	0	36.334	36.334

Tabla 8. Resumen de las opciones contempladas en el caso ejemplo

En este caso en particular, y una vez analizadas las opciones posibles, se opta por inmunizar toda la planta y evitar pérdidas por piezas defectuosas.

Una de las opciones más habituales suele ser invertir en proteger sólo el circuito de control, la inversión es mucho menor y los resultados suelen ser aceptables. Pero en este caso, con un coste por pieza tan elevado, se justifica la necesidad de proteger toda la planta para evitar huecos de tensión en todo el proceso.

Es necesario hacer estudios particulares que faciliten la toma de decisiones basandose en criterios económicos. Para nuestro caso estudio, la inversión en sistemas de mitigación supone una tercera parte de las pérdidas que se tendrían de no haber tomado medidas.



## Capítulo 11. Presupuesto

En este capítulo se calcula el coste aproximado del presente proyecto, diferenciando los recursos necesarios en dos grupos. En el primer grupo, los recursos humanos, se valora el trabajo del autor en este proyecto basado en el número de horas dedicadas al mismo. En el segundo grupo, los recursos materiales, se incluyen tanto las máquinas y los periféricos hardware como también el software necesario para desarrollar y distribuir el proyecto.

Recursos humanos: La dedicación al proyecto ha sido a tiempo parcial, 6 horas diarias durante los 4 meses de realización. El desglose de horas por actividad se muestra en la tabla 9:

Descripción	Medición (horas)
Investigación y búsqueda de información	200
Redacción	150
Elaboración de gráficos y figuras	20
Entrevistas a encargados de producción	90
Realización de presentación en Power Point	20
<b>TOTAL</b>	<b>480</b>

Tabla 9. Horas de dedicación al proyecto

En caso de considerarse un proyecto profesional, se podría estimar un coste de 35 euros por hora, en línea con los precios del mercado para consultores en régimen de autónomo. Por tanto, el coste total de los recursos humanos asciende a:

Total de horas dedicadas x Precio por hora =  $480 \times 35 = 16.800$  euros.

Recursos materiales: El proyecto se ha realizado utilizando software gratuito de libre distribución, es decir, con un coste cero a efectos de presupuesto.

El hardware de trabajo consta de un ordenador de sobremesa e impresora con un coste total de 1200 euros. Tiempo de amortización 60 meses. Dedicación completa al proyecto.

$$\text{Coste de amortización atribuible} = \frac{\text{Coste total}}{\text{Tiempo amortización}} \times \text{Duración del proyecto}$$

Coste de amortización atribuible = 80 euros.

Conexión a Internet, mensualidad de 40 euros. Duración del proyecto 4 meses. Dedicación parcial.

Transporte, 0,08 euros por kilómetro. Distancia recorrida para entrevistas personales a Airbus (Getafe) y a Composystem (Illescas), total 300 km.

En la tabla 10 se muestra el desglose final de costes. Se aplica un factor de dedicación de recursos al proyecto debido a los costes compartidos de algunos de los elementos necesarios en la realización del proyecto.

Descripción	Coste (Euros)	Porcentaje de dedicación	Coste atribuible (Euros)
Mano de obra	16.800	100,00%	16.800
Hardware	80	100,00%	80
Conexión de internet	160	50,00%	80
Transporte	32	100,00%	32
TOTAL			16.992

Tabla 10. Costes de realización del proyecto.

El presupuesto total del proyecto asciende a 16.992 euros.

## **Capítulo 12. Conclusiones.**

Las conclusiones se dividen en dos apartados diferenciados. En primer lugar se describirá la situación percibida sobre la problemática de los huecos de tensión y las soluciones usadas en su mitigación. En segundo lugar, se indicarán las ideas surgidas durante la elaboración del documento de cara a posibles trabajos futuros.

### **12.1 Conclusiones del proyecto**

#### **12.1.1 Técnicas**

Este proyecto ha partido con tres objetivos, la caracterización de los huecos de tensión, el efecto de los mismos sobre la industria y la creación de un protocolo que permita el análisis de inversiones de las instalaciones para mitigarlos.

El primer objetivo se ha cumplido de forma parcial. El estudio de esta perturbación en diversas publicaciones y normativas, para su mejor comprensión, ha perfilado la comprensión de un problema con un impacto directo en las cuentas de resultados de un tejido industrial que cada vez confía más en la electrónica para mejorar su eficiencia. Sin embargo, la dificultad de encontrar datos públicos actualizados sobre la frecuencia de aparición y los costes asociados de los huecos de tensión en la industria ha obligado a realizar el análisis con datos ligeramente desfasados, afectando por tanto, a la precisión del mismo.

Se ha logrado cumplir el segundo objetivo. Una de las principales conclusiones del proyecto es que la solución de este problema no puede ser única y homogénea debido al componente altamente aleatorio de la perturbación, su especial incidencia en la línea de distribución a nivel local y la diversidad de procesos que pueden verse afectados en la instalación del cliente. Estudiar el efecto en la industria obliga a realizar análisis específicos para cada industria y para cada planta de producción. En el presente proyecto se ha logrado elaborar unas pautas homogéneas para detectar los equipos sensibles.

De igual forma, se ha cumplido el tercer objetivo. Se ha diseñado un protocolo para

identificar los procesos más sensibles a los huecos de tensión, obteniendo una guía extrapolable a cada posible caso que facilite el estudio de inversión a realizar. Así como la presentación de un caso ejemplo que ha logrado el objetivo de mostrar, de forma teórica y práctica, la necesidad de invertir en sistemas de protección en un momento de competencia global, de ajustes de precios y de la necesidad de mejorar los procesos, para mejorar los sistemas industriales con el fin de no trasladar sobrecostes al cliente.

### **12.1.2 Personales**

La realización del proyecto ha desarrollado el interés por un tema muy específico de vital importancia en la industria. Dado este carácter específico, ha sido necesario una profundización en ciertos aspectos técnicos complementarios a los obtenidas en la titulación.

Siguiendo esa línea, ha conllevado el aprendizaje sobre búsqueda, redacción y presentación de documentos técnicos, actividad relevante de cara a un posible futuro laboral en el sector industrial.

Al margen de conocimientos académicos, este proyecto ha supuesto comprender la dificultad de un gerente de una planta industrial, o del técnico al que consulta, al tener que tomar decisiones que suponen una importante inversión.

## **12.2 Posibles líneas de trabajo para futuros proyectos**

Ha existido cierta problemática a la hora de elaborar este documento debido a la dificultad de encontrar datos actualizados.

Una línea de trabajo necesaria es el estudio estadístico de la aparición de huecos de tensión a nivel nacional y el efecto en nuestro sistema eléctrico. Es necesario establecer una serie de datos actualizados y organizados, que puedan utilizarse para seguir estudiando el coste que suponen a la industria y las posibles medidas para mitigarlos.

## Bibliografía

1. Avance de Red Electrica Española 2012.
2. Real Decreto 1955/2000 por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica. BOE, Diciembre 2000.
3. Suria Santoso H., Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan. "Electrical Power Systems Quality". McGraw–Hill. Segunda edición, 2004.
4. Tenaga Nasional Berhad. "Power Quality Guidebook. Voltage Sag Solutions for industrial costumers". 2007.
5. Norma UNE-EN 50160, "Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución". Fecha de revisión, 2011.
6. MHJ. Bollen. "Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interrumptions". John Wiley & sons, New Jersey. 2000.
7. MF. McGranaghan, DR. Mueller, MJ. Samotyj. "Voltage Sags in Industrial Systems". 1993.
8. G. Yalginkaya, MHJ. Bollen, PA. Crossley. "Characterization of Voltage Sags in Industrial Distribution Systems". 1998.

9. MHJ. Bollen, E. Styvaktakis, I. Yu-Hua Gu. "Classification of Power Systems Events: Voltage Dips". 2000.
10. K. Yao, D. Koval, W. Su, J. Salmon. "Modelling Consumer Voltage Sags by Distribution Primary Faults". 1999.
11. A. Tompson. "An Accurate Fault Classification Technique for Power System Monitoring Devices" Power Delivery, IEEE Transactions on. 2002.
12. MHJ. Bollen, E. Styvaktakis. "Characterization of three. phase unbalanced dips" Power. Atlanta: Engineering Society Summer Meeting. 2000.
13. CIGRE/CIRED/UIE Joint Working Group C4.110, "Voltage Dip Immunity of Equipment and Installations". 2010.
14. Guasch Pesquer, Luis; Córcolez López, Felipe. "Efectos de los huecos de tensión en las máquinas de inducción y transformadores Trifásicos". Barcelona: Paraninfo. 2006.
15. M. R. Dolatian, A. Jalilian. "Voltage Sag Effect on Three Phase Five Leg Transformers". En: Computer and Systems Engineering. Vol. 18, No. 2. Ene - May 2000.
16. Bong-Seok Kang, Jae-Chul Kim, Jong-Fil Moon, Sang-Yun. "A study of the Impact of Voltage Sags and Temporary Interruptions on 3-Phase Induction Motors" Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University. Seoul, Korea. 1998.

17. H.G. Sarmiento, E. Estrada. "A Voltage Sag Study in an Industry with Adjustable Speed Drives", IEEE Industry Applications Magazine. January/February 1996.
18. Charman. David, J. Y. Chang, J.V. Milanovic. "The cost os Poor Power Quality". 2001.
19. Fredrik Carlsson. Doctoral Dissertation: "On impacts and Ride-Through of Voltage Sags exposings line- operated AC-machines and metal processes". 2003.
20. S-J. Ahn, D-J. Won, D-Y. Chung, S. Moon. "Determination of the Relative Location of Voltage Sag Source According to Event Cause" Power Engineering Society General Meeting. IEEE. 2004.
21. R. García. "La puesta a tierra de instalaciones eléctricas y el R.A.T.", Editorial Productica. 1991.
22. Marcel Didden. "Considerations for Choosing the Appropriate Sag Mitigation Device. Laborelec". Abril 2005.
23. Pterra Consulting. "Application of DVRs in Networks Subject to Reactive Deficiencies". 2007.





## ANEXO 1. Categorías y características de las perturbaciones en el sistema de potencia eléctrico.

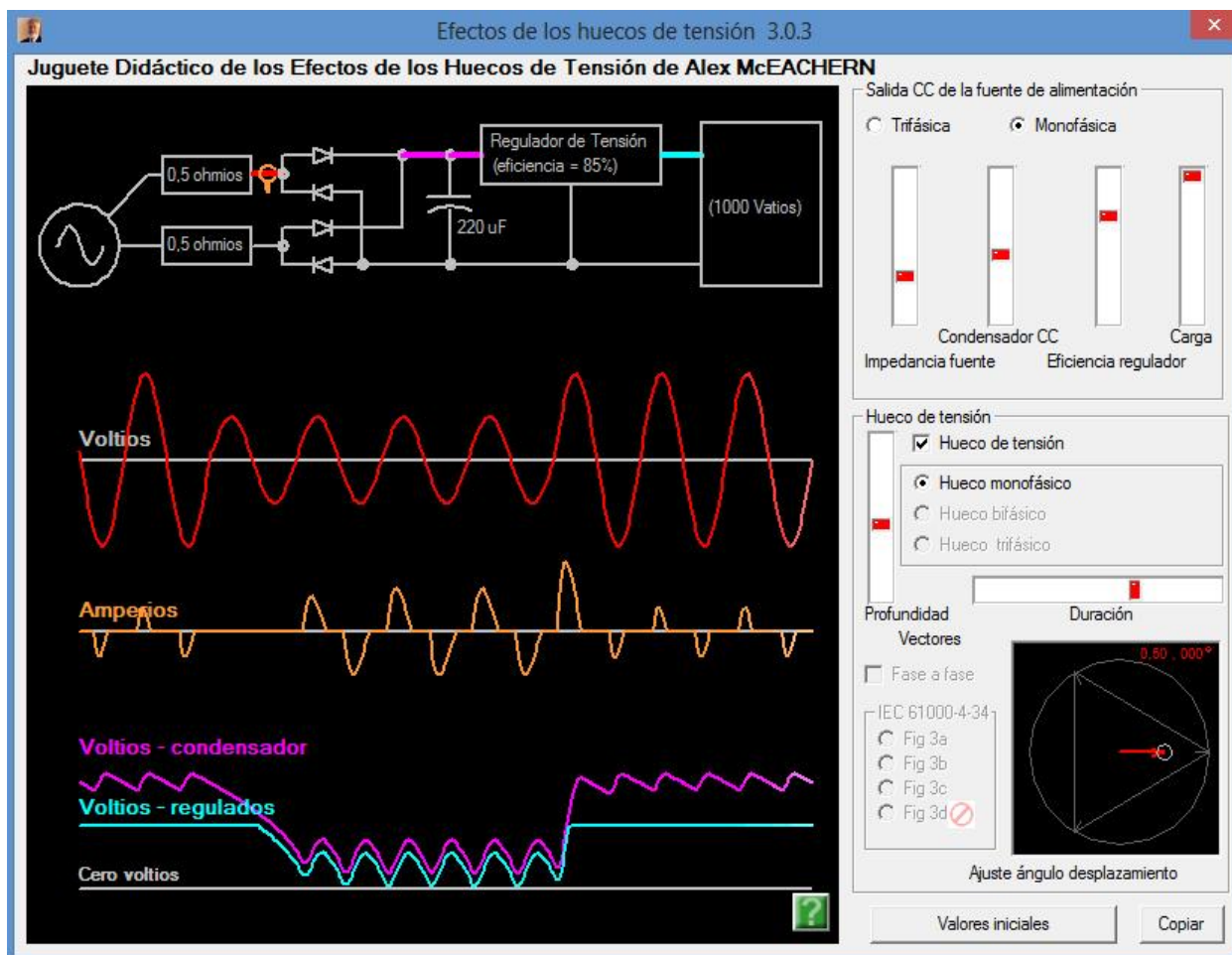
**TABLE 2.2 Categories and Characteristics of Power System Electromagnetic Phenomena**

Categories	Typical spectral content	Typical duration	Typical voltage magnitude
1.0 Transients			
1.1 Impulsive			
1.1.1 Nanosecond	5-ns rise	<50 ns	
1.1.2 Microsecond	1- $\mu$ s rise	50 ns–1 ms	
1.1.3 Millisecond	0.1-ms rise	>1 ms	
1.2 Oscillatory			
1.2.1 Low frequency	<5 kHz	0.3–50 ms	0–4 pu
1.2.2 Medium frequency	5–500 kHz	20 $\mu$ s	0–8 pu
1.2.3 High frequency	0.5–5 MHz	5 $\mu$ s	0–4 pu
2.0 Short-duration variations			
2.1 Instantaneous			
2.1.1 Interruption		0.5–30 cycles	<0.1 pu
2.1.2 Sag (dip)		0.5–30 cycles	0.1–0.9 pu
2.1.3 Swell		0.5–30 cycles	1.1–1.8 pu
2.2 Momentary			
2.2.1 Interruption		30 cycles–3 s	<0.1 pu
2.2.2 Sag (dip)		30 cycles–3 s	0.1–0.9 pu
2.2.3 Swell		30 cycles–3 s	1.1–1.4 pu
2.3 Temporary			
2.3.1 Interruption		3 s–1 min	<0.1 pu
2.3.2 Sag (dip)		3 s–1 min	0.1–0.9 pu
2.3.3 Swell		3 s–1 min	1.1–1.2 pu
3.0 Long-duration variations			
3.1 Interruption, sustained		>1 min	0.0 pu
3.2 Undervoltages		>1 min	0.8–0.9 pu
3.3 Overvoltages		>1 min	1.1–1.2 pu
4.0 Voltage unbalance		Steady state	0.5–2%
5.0 Waveform distortion			
5.1 DC offset		Steady state	0–0.1%
5.2 Harmonics	0–100th harmonic	Steady state	0–20%
5.3 Interharmonics	0–6 kHz	Steady state	0–2%
5.4 Notching		Steady state	
5.5 Noise	Broadband	Steady state	0–1%
6.0 Voltage fluctuations	<25 Hz	Intermittent	0.1–7%

Fuente: "Electrical Power Systems Quality". Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan. McGraw-Hill. Segunda edición, 2004.

La tabla añadida a modo de anexo muestra el documento original de donde se han tomado los valores de profundidad y duración de huecos de tensión para el capítulo 4. De igual forma, resume el resto de las perturbaciones comentadas en el capítulo 3 de este proyecto.

## ANEXO 2. Software *Didáctico de Calidad de Onda* de Alex McEACHERN. Edición 3.0.3.



Se añade como anexo el software de libre distribución usado para distintas simulaciones y se explica algunas de sus características.

El software de Alex McEACHERN permite variar datos y parámetros para comprobar de forma interactiva el efecto de distintas perturbaciones sobre una instalación básica. La pantalla de impresión muestra el circuito básico sobre los que se realizan las simulaciones, en este caso monofásico, con un código de colores para identificar la forma de onda en la parte inferior.

En este proyecto se ha usado la sección de huecos de tensión, variando los valores y eligiendo un sistema trifásico para la realización de la simulaciones del capítulo 4.